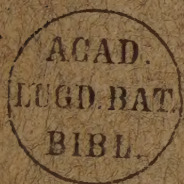


RECHERCHES
DE
TECTONIQUE EXPÉRIMENTALE

Les propriétés métriques
du pli simple

THÈSE

PRÉSENTÉE A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE FRIBOURG (SUISSE)
POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR



PAR

NAZAIRE REICHLIN

INGÉNIEUR

de Schwyz (Suisse)

FRIBOURG — 1913

IMPRIMERIE SAINT-PAUL

RECHERCHES
DE
TECTONIQUE EXPÉRIMENTALE

**Les propriétés métriques
du pli simple**

THÈSE

PRÉSENTÉE A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE FRIBOURG (SUISSE)
POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR



PAR

NAZAIRE REICHLIN

INGÉNIEUR

de Schwyz (Suisse)

FRIBOURG — 1913

IMPRIMERIE SAINT-PAUL

A mon cher Maître
le
Professeur Raymond de Girard

Souvenir reconnaissant.

Le présent travail a été effectué sur la proposition et sous la direction du Prof. Dr. R. de Girard.

Qu'il me soit permis de lui offrir, ici, l'hommage de ma vive gratitude.

PREMIÈRE PARTIE

Historique

Généralités

La méthode instituée en 1905 et publiée en 1908 par M. le prof. *R. de Girard*¹, pour imiter les plis compliqués, a été appliquée de nouveau avec succès à différents cas connus dans la nature par M. le Dr *A. Vogt*² en 1911.

Déjà dans les expériences de M. *de Girard* il apparut que, si on voulait travailler sur des feuilles de plomb épaisses, l'action des doigts seuls ne suffisait plus. Si l'on ne voulait pas se limiter aux plaques minces, on devait nécessairement user d'un appareil spécial. *Vogt*³ se contenta cependant d'une machine dite « raboteuse à table » de l'atelier de mécanique du Technicum. Cependant il était difficile d'obtenir avec cette presse une pression égale, constante et sans secousse. C'est pourquoi M. *de Girard* se décida à faire construire un appareil spécial pour nos expériences sur des plaques de plomb. La construction de cet appareil devait répondre au but tout en occasionnant le minimum de dépenses. La création de l'appareil que j'allais entreprendre lui paraissant faire partie intégrante de mon travail, M. *de Girard* me proposa d'élaborer les plans de la dite machine et d'en diriger la construction. On trouvera plus loin la description de notre machine. Toutefois il convient de retracer en quelques mots l'évolution des appareils de recherches tectoniques⁴.

¹ *De Girard*. « Un nouveau genre de reliefs tectoniques. » « *Eclogae geologicae Helvetiae* », mars 1908. « Notes historiques sur quelques points de géologie mécanique ». Bulletin de la Soc. fribourgeoise des Sciences naturelles, vol. VII, fasc. 3 et 4, p. 8, Fribourg, 1899.

² *A. Vogt*. « Nachahmung complizierter Faltenformen. » Dissertation, Freiburg (Schweiz), 1911.

³ Ibidem, page 53.

⁴ Une étude comparative des expériences réalisées jusqu'à nos jours fera l'objet d'un travail ultérieur.

Les expériences anciennes ¹

Les appareils sont pour la plupart très simples. Le premier fut construit par *James Hall*². Il est à remarquer qu'il suppose déjà, comme effort plissant, une pression horizontale, laquelle est transmise à deux parois guidées qui marchent à la rencontre l'une de l'autre. *W. Paulcke*³ appelle, pour ce motif, *Hall* le père de la géologie expérimentale et dit avec raison : « Un fait s'impose, c'est que les auteurs suivants n'ont pour ainsi dire pas amélioré l'appareil de *Hall*, jusqu'à nos jours il y a été apporté peu de modifications réellement utiles. On peut même dire que, en ce qui concerne les appareils et la disposition des expériences, la tectonique a plutôt perdu et certains de ces dispositifs trahissent la méconnaissance des caractères essentiels du phénomène orogénique.

Viennent ensuite les expériences d'*Alphonse Favre*⁴. Il emploie, comme le feront plus tard M. le prof. *Hans Schardt*⁵ et MM. *Mellard Reade*⁶, des bandes élastiques portant un certain nombre de couches superposées. Quoique quelques-unes de ces expériences, spécialement celles de M. *Schardt*, soient de très grand intérêt, ces savants ont néanmoins peu contribué à l'amélioration de l'appareil de *James Hall*.

¹ Par expériences anciennes, j'entends celles qui ont précédé les travaux de l'Institut géologique de Fribourg.

² *James Hall*. « Transact R. Soc., Edinburgh », tome VII, 1813.

³ *W. Paulcke*. « Das Experiment in der Geologie. » Berlin, 1912, pag. 7 et 8.

⁴ *Alphonse Favre*. « Archives des Sc. phys. et nat. », tome LVII, juin 1878. « Premier Congrès international de géologie », 1 vol. Paris, 1878.

⁵ *Hans Schardt*. « Etudes géologiques sur le Pays d'en Haut vaudois », Troisième partie : A. « Mécanisme des dislocations », chapitre xv à xvii. Bulletin de la Soc. vaudoise des Sc. nat., vol. XX, N° 90, 1884.

⁶ *Mellard Reade*. « The origine of Mountain Ranges considered experimentally, structurally dynamically and in relation to their geological hystory », London, 1886.

*Daubrée*¹, par contre, réalisa des progrès considérables dans l'agencement des expériences. Puis suivent *Pfaff*², *Forchheimer*³, *Henry Cadell*⁴, *Ed. Reyer*⁵, *Meunier*⁶ et *Bailey Willis*⁷ dont l'appareil mérite une mention spéciale, tandis que les expériences de *Link*⁸ et *Blaas*⁹ ne servirent qu'à la démonstration.

Les expériences nouvelles

Expériences de MM. de Girard et Vogt. — Une direction nouvelle dans le domaine de la géologie expérimentale a été suivie, ainsi que je l'ai mentionné déjà, par le Prof. Dr *R. de Girard* et le Dr *A. Vogt*. Ces géologues sont partis de la con-

¹ *A. Daubrée*. « Etudes synthétiques de géologie expérimentale. » Paris, 1879. « Essai d'une classification des cassures de divers ordres, que présente l'écorce terrestre. » Bulletin de la Soc. géol. de France, 3^{me} série, p. 10. 1882.

Daubrée-Gurlt. « Synthetische Studien zur Experimentalgeologie. » Braunschweig, 1880.

² *Pfaff*. « Der Mechanismus der Gebirgsbildung », Heidelberg, 1880

³ *Forchheimer*. « O. Lehmann Molekularphysik. » I. Bd., Leipzig, 1888. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie, u. Paläontologie, I. Bd., 1893.

⁴ *Henry Cadell*. « Experimental Researches in Mountain Building. » Transact. R. Soc. of Edinburgh, vol. XXXV, 1888.

⁵ *Ed. Reyer*. I. « Ursachen der Deformation u. der Gebirgsbildung. » Leipzig, 1912.

2. « Geologische u. geographische Experimente. » I. Heft, « Deformation u. Gebirgsbildung. » Leipzig, 1892. II. Heft. « Vulkanische u. Masseneruptionen. » Leipzig, 1892. III. Heft. « Rupturen. » Leipzig, 1894. IV. Heft. « Methoden u. Apparate. » Leipzig, 1894.

⁶ *Stanislas Meunier*. « Imitation expérimentale des grands traits orogéniques de l'Europe. » « La Nature, 1^{er} semestre, Paris, 1896. « La géologie expérimentale. » Paris, 1899. « Crochons expérimentaux » « Le Naturaliste », 19^{me} année. Paris, 1897.

⁷ *Bailey Willis*. « The Mechanics of the Appalachian Structure. » U. S. Geological Survey Thirteenth, A. R., Washington, 1893.

⁸ *G. Link*. « Apparat zur Demonstration der Gebirgsbildung. » Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, 1902.

⁹ *J. Blaas*. « Über geologische Studien und Unterrichtsmodelle. » Geologische Rundschau, Bd. I.

sidération que la formation de plis compliqués n'est possible qu'à la condition d'éviter les ruptures. Voilà pourquoi M. de Girard ¹ dit : « Le but que je poursuis dans cette série d'expériences est la reproduction des formes de plissement. Or, quand elle survient sous l'action d'un effort plissant, la fissuration n'est qu'un moyen employé par la matière pour éluder l'obligation de se plisser. Donc, pour pousser aussi loin que possible la réalisation de plis compliqués, il faut éviter que la fissuration n'intervienne ; dès qu'elle se produit, l'expérience est terminée. »

Il s'ensuit donc que la matière employée doit être flexible sans faire ressort ; tel est le plomb. Et il opère toujours sur des feuilles et non sur des masses de forme quelconque. En conséquence, il divise ses expériences en trois groupes :

Production :

- a) De plissements seuls ;
- b) De ruptures seules ;
- c) Combinée de plissements et de ruptures.

Expériences de M. W. Paulcke ². — Ce savant part aussi de l'idée que la formation des montagnes est un phénomène purement mécanique que, par conséquent, les formes créées peuvent, en principe, être reproduites par l'expérience. Il croit cependant que l'expérience ne peut atteindre qu'à une approximation rudimentaire. Son appareil, tout en fer et très résistant, est probablement le meilleur qui ait été construit jusqu'ici. Il place dans une caisse longue de 1 m. 16, large de 0 m. 98 et profonde de 0 m. 60, la masse à plisser consistant en couches horizontales différant les unes des autres quant à leur plasticité et quant à leur épaisseur. Il soumet ces couches à une pression horizontale en mettant en mouvement, à l'aide des tiges filtées, l'une des parois de la caisse.

Un détail de construction, sans influence il est vrai sur le résultat,

¹ De Girard, op. cit., page 5.

² Prof. Dr W. Paulcke. I. « Kurze Mitteilungen über tecton. Experimente. » Sonderabdruck aus den Jahresberichten und Mitteilungen des oberrheinischen geologischen Vereins. Neue Folge Bd. I, Heft 2, Seite 56-66. Karlsruhe, 1911. II « Über tecton. Experimente », Vortrag. Versammlung deutscher Naturforscher und Aerzte zu Karlsruhe 1911. Leipzig, 1911. III. « Das Experiment in der Geologie. » Berlin, 1912.

mais qui n'en est pas moins ingénieux et par conséquent intéressant à noter, est le suivant :

Pour que les vis motrices n'aient pas besoin d'être trop longues, on a placé devant la paroi mobile une autre paroi qui leur est reliée. La pression motrice peut lui être transmise par des blocs interposés de longueur variable. Pour empêcher ces deux parois de dévier, on les fait conduire par des tenons circulant dans des coulisses horizontales. — Le fond de la caisse est constitué par une mosaïque dont les compartiments peuvent être élevés ou abaissés et cela avant et après la sédimentation et avant ou pendant le refoulement. — Nous avons été heureux de trouver chez M. W. Paulcke des considérations analogues à celles qui nous ont guidé nous-même dans la construction de notre appareil. — Sur les couches à plisser, ce savant exerce une pression artificielle à l'aide de couches épaisses formées de matière grasse ou de sable sur lesquelles repose une mosaïque de planchettes supportant des poids en fer. Du fait que M. W. Paulcke soumet ces couches à une pression assez forte, il en empêche la fissuration pure et simple ; mais cette pression n'étant pas assez considérable pour entraver complètement l'ouverture des fentes, le résultat atteint par ces expériences constitue ce que Heim¹ appelait le plissement avec rupture auquel correspond notre *stade C*.

Comme matière à plisser, M. W. Paulcke emploie des couches d'argile, de gypse ou de sable diversement colorées.

Ses expériences portent sur les trois types suivants :

I. Imitation du plissement jurassien ;

II. Reproduction de la tectonique des Alpes occidentales à facies helvétique ;

III. Imitation de la structure alpine orientale et lépontienne.

Ces expériences sont pleines d'intérêt et très instructives, mais pour les motifs déjà indiqués, il m'est impossible d'en parler plus longuement.

Expériences de M. C. Rimbach². — Dans une première série intitulée : « Recherches sur le mode de plissement de l'écorce solide

¹ A. Heim. « Mechanismus », II. Bd., pag. 12 Basel, 1878.

² Carl Rimbach in Montevideo. « Versuche über Gebirgsbildung. » Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie. xxxv Beilageband. Drittes Heft. Stuttgart, 19 April 1913.

de la terre par suite de la contraction du noyau », ce savant emploie, comme *Daubrée*¹, un ballon de caoutchouc d'une grandeur (diamètre 25 cm.) à peu près égale. Il ne se préoccupe pas de savoir si le rapport existant entre l'épaisseur de sa couche de sable et le diamètre de son ballon correspond aux dimensions relatives de la lithosphère terrestre et de son noyau contractile. *Daubrée*² de même avait conscience de cette disproportion quand il écrivait : « Les expériences dont il va être question, n'ont pas la prétention de représenter ces phénomènes. Cependant leurs résultats présentent, dans les apparences extérieures, assez d'analogie avec les rides de l'écorce terrestre pour qu'il ne soit peut-être pas inutile de les signaler. » Le même auteur³ s'exprime ainsi sur les possibilités et les conditions qui régissent la reproduction expérimentale : « Il y a certaines limites dans les épaisseurs relatives de la couleur (employée comme sédiment) et du ballon entre lesquelles il convient de se placer. Si le ballon a trop d'épaisseur, il n'obéit plus à l'action de l'enduit. » Les expériences de *Daubrée* dans cette direction furent peu étendues, tandis que les recherches de M. *Rimbach* expliquent toute une série de phénomènes.

Dans la seconde partie « Expériences sur le processus des chevauchements » que nous pouvons appeler la partie proprement tectonique de son travail, il emploie une caisse assez étroite pour que l'expérience ne fournisse guère que des profils. Deux fortes plaques de verre, longues d'à peu près 80 cm., placées à une distance de 5 cm. l'une de l'autre, sont fixées à une forte latte et maintenues à leurs extrémités par des lattes verticales réunies à leurs sommets. Entre les deux plaques de verre se meuvent, en sens inverse, les deux refouloirs, de forme et de hauteur variables pour chaque expérience. Comme matière à plisser il emploie du sable fin dont il fait varier la plasticité en y ajoutant de l'eau⁴. Ces expériences n'ont aucun

¹ *A. Daubrée*. Op. cit. Chapitre II, § 6, page 385. « Expériences sur l'action et la réaction exercées sur un sphéroïde qui se contracte par une enveloppe adhérente et non contractile. »

² Loc. cit.

³ Op. cit., page 387.

⁴ Bien qu'humecté, le sable employé par M. *Rimbach* représente une masse bien moins cohérente que la plupart des couches de la lithosphère. Mais nous connaissons aux environs de Fribourg — aux gravières de St-Antoine et de St-Ours — des couches de sable que leur sécheresse relative n'a pas empêchées de former de très jolis plissements.

rapport avec les nôtres. D'abord parce que la matière plissée n'est pas la même, puis parce que l'arrangement même des expériences se trouve être tout autre.

La troisième partie : « Influence du refoulement sur la structure des roches » appartient plutôt à la série des expériences petrographiques, tandis que la quatrième partie : « Recherches sur les conséquences statiques du soulèvement montagneux », rentre de nouveau dans le domaine de la tectonique. Quelques-unes des questions effleurées ici se représenteront dans nos expériences relatives à l'influence des « Graben » et des « Horst » sur le plissement. La cinquième partie « le volcanisme » demeure en dehors de nos recherches.

Expériences de MM. Königsberger et O. Morath¹. — Ainsi que l'indique le titre de leur travail, ces Messieurs s'efforcent de donner aux expériences géologiques une base solide, en précisant le rapport qui existe entre les déterminants des phénomènes naturels et ceux qui régissent les expériences de laboratoire. Par le fait se trouvent fixées les conditions requises pour l'établissement d'un modèle reproduisant fidèlement la nature.

Ainsi on ne conclura plus de la plus ou moins fidèle conformité du modèle avec la nature, à la justesse de l'expérience mais, au contraire, désormais c'est l'expérience qui contrôlera les observations sur le terrain. C'est l'idée émise déjà en 1908 par M. le prof. *de Girard*² lorsqu'il écrivait : « La lithosphère terrestre, dans son ensemble, ou une strate rocheuse, en particulier, étant des plaques, on peut licitement leur appliquer les conclusions que fournissent les expériences de plissement et celles-ci deviennent un criterium pour juger de la *possibilité* des formes tectoniques, dans les cas fréquents où l'étude du terrain conduit à en admettre de compliquées sans fournir des indices absolument certains de leur réalité. »

Se basant sur les travaux de *H. v. Helmholtz*³ relatifs aux modèles hydrodynamiques et aérodynamiques, nos auteurs préten-

¹ *Königsberger et O. Morath*. « Theoretische Grundlagen der experimentellen Tectonik. » Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft. N° 2-65. Bd., 1913.

² *R. de Girard*. « Sur un nouveau genre de reliefs tectoniques. » Eclogae geol. Helv., mars 1908.

³ *H. v. Helmholtz*. Wissenschaftliche Abhandlungen, I. S. 158, 1882.

dent que, dans les problèmes de mécanique des solides qui apparaissent dans la théorie de la formation des montagnes, une détermination exacte des qualités d'un modèle parfait est possible. Partant du fait que toutes les qualités ou constantes physiques d'une substance peuvent être ramenées aux trois notions de *masse*, de *longueur* et de *temps*, les auteurs supposent que la proportion des longueurs entre la nature et le modèle est, par ex., de *cent* kilomètres à *un* mètre. En donnant aux qualités de la nature l'indice *zéro* et à celles du modèle l'indice *un* nous obtenons :

$$\frac{l_1}{l_0} = \frac{1}{100.000} = 1.10^{-5}.$$

Les modèles de MM. *Koenigsberger* et *Morath* se composent de pièces mobiles. En imprimant à ces pièces des mouvements qui imitent ceux de la nature, ils font passer leurs modèles d'un état initial correspondant à la physionomie de la région avant toute dislocation, et à travers une série de transformations, à un état final reproduisant la situation actuelle des masses rocheuses dans cette même région.

Le temps est calculé dans la supposition que l'accélération, dans les mouvements imposés au modèle et dans la nature, est la même.

$$l_0 t_0^{-2} = l_1 t_1^{-2}$$

$$\frac{t_1}{t_0} = \sqrt{\frac{l_1}{l_0}} = 1.10^{-\frac{5}{2}} \simeq \frac{1}{300}$$

t_0 étant inconnu et presque indéterminable, nous pouvons admettre, avec les auteurs, qu'en réalité la durée du phénomène dans le modèle est indifférente pourvu qu'il ne s'y manifeste pas de vitesses appréciables (plus de 0,1 cm. p. sec.).

Supposant, à titre d'exemple, un processus tectonique ayant duré 180 mois de l'ère tertiaire, l'auteur conclut de la formule précédente que l'imitation fidèle de ce processus dans son modèle devra durer 0,6 mois et il dit : plus les transformations dans le modèle seront lentes et progressives, plus exactement elles correspondront à la nature.

La proportion entre les masses se détermine par l'égalité des densités, comme suit :

$$m_0 l_0^{-3} = m_1 l_1^{-3}$$

$$\frac{m_1}{m_0} = 1.10^{-15}$$

La profondeur du modèle devrait être, pour le moins, de cinquante centimètres « si nous supposons située à une profondeur de cinquante kilomètres, la surface suivant laquelle les tensions s'égalisent ». Ces conditions, pour un modèle parfait, n'ont été réalisées jusqu'ici, et encore qu'approximativement, que par M. W. Paulcke. Les voici : « Les couches doivent pouvoir se briser par leur propre poids puis se resouder de même. Les constantes varient d'une couche à une autre. » M. le prof. de Girard¹ dit de même : « Pour les réaliser (les cassures), il suffira d'enlever à une plaque déchirable, posée horizontalement sur un plancher mosaïque, une portion limitée de son support. »

Les expériences de nos auteurs furent exécutées seulement à l'aide d'un appareil de 40×30×20 centimètres et par conséquent cette reproduction des phénomènes naturels ne saurait prétendre à une fidélité absolue.

Ils donnent la composition de la matière à plisser, on la trouvera à la page 76 *op. cit.* Ils effectuent le refoulement, à l'aide d'une pression horizontale, exercée par une paroi latérale. Les auteurs ne nous ont pas encore donné une description complète de leur appareil, espérons qu'ils ne nous la feront pas attendre longtemps. En dépit des dimensions réduites de l'appareil, les résultats obtenus sont très intéressants et certaines conclusions s'accordent avec celles que nous-même avons tirées de nos expériences.

[1] R. de Girard. « Recherches de tectonique expérimentale », page 9.

DEUXIÈME PARTIE

Les expériences de l'auteur

La méthode et l'appareil

Description de la machine à plisser¹. — Cette machine est montée sur une table de bois massive. Elle se compose de deux parties essentielles : la presse et le coordinatographe.

La presse. — Celle-ci est mue par une roue de commande qui transmet le mouvement à deux roues dentées, lesquelles sont reliées solidement à deux arbres à vis, longs d'un mètre ; ceux-ci, de leur côté, sont ancrés dans un fer **U** de manière à rester mobiles. Les arbres filtés transmettent la pression à des écrous qui glissent dans deux coulisses, les empêchent de dévier et garantissent les arbres de toute déviation. Pour augmenter la stabilité des coulisses, on les a fondues d'un seul bloc avec une plaque de fonte qui est fixée à la table. Les écrous glissant dans les coulisses en queue d'arronde sont reliés entre eux par une barre carrée en fer forgé : *la mâchoire*. Sur la mâchoire est vissée une tôle, dont la section est $0,4 \times 4,0$ cm. et qui a pour but d'empêcher les couches de se séparer les unes des autres à leur extrémité mobile, pendant le plissement.

En donnant un tour à la roue de commande, la mâchoire ne se déplace que de $3,4 \frac{m}{m}$ grâce à la faible ampleur du pas de vis et au rapport approprié des engrenages, et nous pouvons exercer facilement une pression de deux mille kilogrammes.

Grâce à ce dispositif nous sommes à même de produire des mouvements lents (vitesse minimale ca $0,001$ cm/sec) et à peine perceptibles qui correspondent, d'après notre conception, aux mouvements qui ont formé les chaînes de montagnes.

Notre machine se prête spécialement aux expériences sur des plaques de plomb, et a été construite avant tout dans ce but.

¹ Cette machine a été construite dans l'atelier de mécanique du Technicum sous l'excellente surveillance du directeur, M. l'ingénieur Clément. Commencée le 3 avril 1912, elle fut achevée à la fin de juillet.

Néanmoins des expériences peuvent être faites sur des matériaux plastiques d'une épaisseur de couches moyenne.

Dans ce cas la mâchoire peut être dévissée pour être remplacée par un cadre en forme de caisse, dont les côtés s'engagent dans deux fentes verticales ménagées à travers l'âme du fer **U**.

En général, notre machine permet d'opérer sur des feuilles d'une matière quelconque. La surface sur laquelle reposent les couches à plisser consiste en un parquetage de 18 blocs (surface 13.3×13.3 cm.) carrés en bois de noyer.

Cette dimension des blocs est choisie pour que neuf de ces blocs forment un carré de 40×40 cm., ce qui est la dimension normale de nos feuilles à plisser. Cette mosaïque de blocs a un but spécial. Elle nous permet de produire aisément un « Horst » ou un « Graben » en enlevant ou en ajoutant un bloc. Le Graben prend, en ce cas-là, une profondeur de sept cm., tandis que par la superposition de plusieurs blocs je puis donner à mon « Horst » la hauteur que je veux.

On peut également faire varier le contour des « Horste » en employant des bois de modèles différents. Pour tout le reste je renvoie à la figure et à la coupe de la machine.

*Le Coordinatographe*¹. — Dans beaucoup d'expériences de plissement, il est important de connaître les valeurs relatives et absolues de la déformation. Dans ce but, l'une des coulisses est divisée en centimètres, tandis que l'écrou qui s'y meut porte un vernier. Cette disposition permet de déduire les grandeurs sus-indiquées par une simple lecture. Parallèlement à la direction de la pression sont fixées, de part et d'autre de la table, des barres graduées sur lesquelles glisse un cadre mobile. A travers le cadre, une aiguille graduée se meut verticalement et dans le sens perpendiculaire au refoulement. Cela nous permet de caractériser la forme correspondante à un stade quelconque de la déformation. Les nécessités de la construction ont obligé à admettre une distance de cinq millimètres entre les origines

¹ La graduation a été faite avec une machine à diviser. (Société genevoise pour la construction d'instruments de physique à Genève, N° 0015), que M. le Prof. Dr Joye, alors directeur des travaux pratiques à l'Institut de physique, a mise gracieusement à notre disposition.

de la graduation sur la coulisse et sur la barre. Si la lecture de la coulisse donne x_c et celle de la barre x_b , on obtient la relation

$$x_c = x_b - 0,5 \text{ en centimètres.}$$

Dans certains cas il était désirable de produire un ou plusieurs plis d'une hauteur bien déterminée et avec une certaine inclinaison de leur ligne de faite. Cela se fait automatiquement par l'emploi du couvercle en bois de chêne. Celui-ci est maintenu vers chacun de ses quatre angles par deux tenons. L'inférieur le supporte, le supérieur l'empêche de s'élever. Les deux tenons ont l'extrémité sphérique, pour que le couvercle reste toujours tangent à ces sphères d'appui. Les tenons montés sur chaque tige sont séparés par un ressort à boudin. Le couvercle peut prendre une inclinaison quelconque de **0** à **24°**. Cette valeur de **24°** peut être augmentée encore en remplaçant les tiges des supports, longues de 24 cm., par d'autres plus longues.

La méthode. — Comme nous l'avons vu dans la partie historique de ce travail, MM. *Koenigsberger* et *O. Morath*¹ partent de l'analogie mécanique qui doit exister entre le modèle et la nature.

Sur l'analogie mécanique, M. A. *Föppl*² s'exprime comme suit : « La notion de l'analogie mécanique entre deux systèmes implique l'analogie géométrique au moins entre les parties essentielles de ces deux systèmes ; mais cette notion ne s'arrête pas là. » Il dit ensuite :³ « Une analogie mécanique absolue ne peut, la plupart du temps, pas être obtenue ou du moins elle exige la mise en œuvre d'artifices hors de proportion avec le but à atteindre. Il suffit qu'on maintienne l'analogie dans les points essentiels du problème qu'on étudie. A cette condition, on pourra se permettre toutes dérogations au principe d'analogie que rendront indispensables les possibilités ou les nécessités de l'expérience.

Pour décider jusqu'où on pourra aller dans la voie de ces déro-

¹ Op. cit.

² Dr *Aug. Föppl*. « Vorlesungen über technische Mechanik. » IV. Bd., Dynamik, page 321. Leipzig, 1899.

³ Ce que M. *Föppl* dit des modèles de navires s'applique dans une certaine mesure à tous les modèles et par conséquent aussi aux modèles tectoniques.

gations, il faudra dans chaque cas se livrer à une analyse scrupuleuse des conditions capables d'influencer le résultat. »

Quant à nos expériences à nous [à la machine], elles ne s'occupent que du côté géométrique du problème. Pour satisfaire à l'analogie mécanique dont on vient de parler, nous devrions faire intervenir les résistances que la région disloquée des couches éprouve du fait de leur attache avec le voisinage non disloqué. Des difficultés d'ordre pratique dont on triomphera dans l'avenir empêchent, pour le moment, d'atteindre à un si haut degré d'analogie dans les expériences faites avec la machine.

La principale de ces difficultés consiste en ce que l'action qui doit déterminer le plissement ne peut s'exercer que sur le bord des feuilles de plomb.

Il en va tout autrement des expériences où la machine n'intervient pas et où le plissement est produit par la seule action des doigts.

Dans ce cas, l'opérateur peut agir directement sur le milieu d'une grande plaque, faire naître la dislocation dans cet endroit et y déterminer le maximum de la déformation. On constate, ainsi que l'a fait remarquer M. *R. de Girard*¹, « dans tout plissement, à quel type qu'il appartienne, trois parties concentriques : au milieu une région à déformation complète, où le froissement caractéristique du type est entièrement réalisé ; — une zone de simplification, où ces froissements s'atténuent jusqu'à se résoudre en plis couchés ; — enfin à la périphérie, une zone d'extinction qui ne renferme plus que des plis droits. Cette dernière confine au voisinage non disloqué par la ligne d'extinction. Donc les froissements, si compliqués soient-ils, de la région centrale d'un pli sont abolis, avant que celui-ci entre dans sa zone d'extinction. »

« Il s'ensuit que « la nécessité de s'éteindre à la périphérie n'empêche pas un ridement de se compliquer dans sa région centrale. Lorsqu'on étudie les froissements de cette région, on peut donc faire abstraction de la zone de simplification et, à plus forte raison, de celle d'extinction. Par conséquent, l'étude des plis en travées limitées est légitime. » Or, ce sont là les conditions dans lesquelles j'opère avec ma machine.

¹ *R. de Girard*. « Recherches de tectonique expérimentale. » Tome I^{er}, page 54.

La matière employée et ses dimensions. — Les méthodes employées pour le plissement des feuilles de plomb sont relativement simples. En étendant la plaque sur la table de l'appareil entre les mâchoires de celui-ci, et en tournant la roue de commande, le pli se forme immédiatement. Le plomb dont nous nous servons est de première qualité. Le commerce ¹ le livre en rouleaux de 1 m. 30 à 1 m. 40 de long. Je les découpe en plaques carrées. Les expériences de plissement avec ruptures sont un peu plus difficiles à réaliser. En premier lieu, il s'agit de trouver une matière possédant les qualités voulues. Une première série d'essais avec des feuilles d'asphalte ne nous a pas donné de résultats concluants ; nous reprendrons ces essais. Plus tard nous employâmes de l'argile dont nous faisons varier la consistance en la gâchant avec des quantités toujours plus grandes d'eau. Dans le cas où l'expérience devait durer quatre ou cinq heures, nous ajoutons de l'huile, dans le but de diminuer l'évaporation et, par conséquent, de ralentir le desséchement de la masse. De cette façon il devient impossible que des fentes de dessiccation se mêlent aux cassures résultantes. D'abord, j'essayai de plisser des couches d'argile seules, mais on n'y arrive pas toujours ; on réussit déjà mieux en les faisant reposer sur une feuille de papier. On s'approche davantage encore de la réalité, en étendant l'argile sur une feuille de plomb. Afin d'assurer à l'argile une épaisseur constante, je la lamine en y passant un rouleau compresseur dix fois dans un sens, dix fois dans le sens perpendiculaire ; ce procédé se répète jusqu'à ce que l'épaisseur voulue soit atteinte. Alors le plomb représente les sédiments de la profondeur, obligés de se plisser sans ruptures selon la théorie de la « plasticité latente » de M. A. Heim ², tandis que la couche d'argile figure les assises superficielles capables de fissuration. Le passage de la couche plissée sans rupture à la couche plissée avec rupture est, dans ce cas, un peu brusque, mais il est impossible de l'éviter ³. Dans certaines expériences j'ai été amené à tracer sur la feuille à plisser une division en centimètres. Comme cette graduation ne peut pas être établie sur

¹ Maison E. Wassmer, à Fribourg.

² A. Heim. « Mechanismus der Gebirgsbildung », II. Bd.

³ Eu égard aux très faibles épaisseurs des plaques plissées, l'absence d'une couche de transition n'a plus alors aucun inconvénient et les résultats n'en sont pas influencés.

l'argile, je la trace sur le bord de la feuille de plomb. D'autre part, si j'arrêtais le revêtement argileux à la graduation, il me serait impossible d'assurer à ce revêtement une épaisseur uniforme. Pour y parvenir, je suis forcé d'étendre l'argile d'un bord à l'autre de la feuille de plomb. Je protège donc la graduation par une bande de papier qui l'isole de l'argile et, une fois le revêtement opéré, j'enlève la bande d'argile voulue pour faire réapparaître la graduation.

La plaque à plisser étant prête, l'expérience peut commencer.

Le temps¹ dont nous avons besoin pour réaliser les déformations dans le modèle, ne peut pas être dans une analogie *exacte*² avec les conditions naturelles telles que nous sommes portés, jusqu'ici, à nous les figurer³. Il y a parmi les conditions de l'expérience certains facteurs, tel que le temps nécessaire au séchage de l'argile ou l'impos-

¹ Quant à la durée du processus de plissement, les opinions divergent. Comme preuve j'allègue deux auteurs :

M. L. de Launay disant qu'il y a « deux sortes de manifestations que présente l'écorce terrestre ; les unes lentes, continues, insensibles, qui peuvent être assimilables aux phénomènes de plissements ; les autres, soudaines et rapides, qui pourraient nous donner une idée de ce qu'ont été les effondrements. » (*La science géologique*, page 344. Paris, 1913.)

M. Louis Rollier qui dit : « ... les intervalles constatés entre la plupart des mouvements orogéniques démontrent que les phases de repos sont d'une durée beaucoup plus considérable que celles de l'action orodynamique, ... De même personne jusqu'ici n'a pu constater que la période actuelle puisse être considérée autrement que comme une période de repos dans le plissement du sol... Il semble au contraire que les régions offrant, à certaines époques, les conditions nécessaires au plissement aient été plissées en un temps relativement court et dans un seul mouvement, jusqu'à rendre stable et rigide la portion de l'écorce terrestre qui avait jusque là possédé une certaine flexibilité. Cela ne veut pas dire que la même chaîne de montagnes n'ait pas pu subir en tout ou en partie et à plusieurs reprises, des phénomènes orogéniques ou des dislocations diverses. Mais il n'est pas possible de montrer, dans les contrées bien étudiées géologiquement, un déplacement lent du plissement et de l'érosion du sol, accompagnés de phénomènes de regressions et de transgressions marines. Ces trois derniers phénomènes seuls sont lents, tandis que le premier est relativement rapide. » (*Sur le plissement du sol de l'Europe centrale aux différents âges géologiques.* » Extrait des Archives des Sciences physiques et naturelles. Tome XXX, novembre 1910.)

² Koenigsberger et O. Morath. Op. cit.

³ Heim. « Mechanismus », II. Bd.

sibilité de descendre au-dessous d'une certaine valeur pour la vitesse motrice, qui réduisent à fort peu de chose notre liberté d'action en ce qui concerne le temps à employer.

Une série d'expériences, qu'il ne sera possible de terminer que plus tard, montre déjà très nettement l'influence que le temps employé pour la déformation exerce sur la forme géométrique du modèle obtenu. Et nous sommes persuadés qu'il est réservé à l'expérimentation d'éclairer, peut-être même de corriger, les notions que nous avons relativement à la durée des phénomènes orogéniques¹.

¹ La partie de mon travail qu'on vient de lire a déjà paru seule, sous le titre « Une nouvelle machine à plisser », dans l'Annuaire de l'Institut géologique de Fribourg, 1912.

Expériences

sur le rapport entre la valeur du refoulement et la hauteur d'un pli simple ¹

Généralités. — De tous les phénomènes orogéniques, le plus important, sans contredit, est celui qui se présente à nous sous la forme de montagnes plissées et qui a été principalement imité par la géologie expérimentale. Et cependant, nous ne savons que peu de choses sur la nature de chacun des plis et sa formation.

Nous savons, par exemple, qu'en plissant une matière flexible quelconque, la hauteur du pli augmentera avec l'intensité du refoulement. Cela pourra durer jusqu'au moment où le pli, d'abord droit, commencera à se coucher. La hauteur atteint alors son maximum ; à partir de là, elle diminue. Les expériences qui vont suivre auront donc pour but d'étudier *l'augmentation de la hauteur du pli en fonction du refoulement ; la valeur de celui-ci pour chacune des étapes de l'expérience étant mesurée par le raccourcissement en projection horizontale.*

La longueur de l'axe ² d'un pli n'ayant aucun rapport avec sa hauteur, nos expériences porteront principalement sur des tronçons de plis ; par conséquent nous ne serons plus tenus d'employer pour nos expériences des lames équilatérales. Si, malgré cela, nous employons dans la suite des lames carrées (à une seule exception près), ce sera en vue de conserver aux expériences faites jusqu'aujourd'hui leur homogénéité.

¹ Un pli simple est un pli dont les flancs sont droits au lieu d'être repliés. Dans un pli composé, les deux flancs ou l'un des deux, ou la charnière, sont repliés. Prof. Dr *Otto Wilkens*. « Grundzüge der tecton. Geologie », page 10. Iéna, 1912. « Pour distinguer ces plis du pli principal ou primaire, on les nomme plis secondaires. » *Ibidem*, page 18.

² *Alb. Heim*. « Mechanismus », II, p. 204.

*M. Heim*¹ nous fournit quelques chiffres pour calculer le refoulement en terrain disloqué :

Appelant avec lui la largeur primitive d'une couche L_0 et la largeur de la même couche après le refoulement L_1 la fraction $\frac{L_1}{L_0}$ nous donnera le refoulement relatif ; $L_0 - L_1$ le refoulement absolu. A ces deux notions, j'ai ajouté dans mes tableaux la nouvelle expression $\frac{L_0 - L_1}{L_0} \cdot 100$ qui représente le refoulement absolu en pour cent de la largeur primitive L_0 et nous facilitera beaucoup la comparaison entre des lames plissées de largeur différente. Comme hauteur nous avons pris constamment la hauteur moyenne, résultant de la moyenne arithmétique des hauteurs mesurées aux deux extrémités du tronçon dans l'expérience considérée. La différence entre les métrages dépasse rarement 1 $\frac{m}{m}$. Quoique théoriquement les lectures effectuées à l'aide du coordinatographe donnent un résultat constant, nous avons cependant constaté parfois une légère différence, qui, d'ailleurs, n'atteint pas 1 $\frac{m}{m}$. Cette différence s'explique aisément par le fait que la plaque mise en expérience ne touche pas d'une façon rigoureusement égale le refouloir et le buttoir.

Pour calculer l'augmentation de la hauteur par unité du refoulement, nous avons pris pour quotient différentiel :

$$\frac{\Delta h}{\Delta z} = \frac{hm_2 - hm_1}{za_2 - za_1}$$

C'est ainsi que nous arrivons à nous faire une image claire de l'augmentation progressive de la hauteur. Nous nous rendons compte que l'augmentation progressive de la hauteur est plus sensible dans la partie initiale 0-4 % de la courbe. Elle y dépasse souvent 2. A partir de là, nous constatons un ralentissement dans l'augmentation. Les données figurant dans mes tableaux sont claires et évidentes pour quiconque tient compte de ce que L_x est égal à lecture sur l'axe des X

¹ *A. Heim*. « Mechanismus », II, p. 214. Voir aussi : *De Girard*. « Formation des Montagnes, chapitre VII « Valeur du Retrait de l'écorce terrestre. » Manuscrit 1888. — Prof. D^r *C. Schmidt* : Bild und Bau der Schweizeralpen. Basel, 1907. — Ed. *Reyer*. Ursachen der Deformation und der Gebirgsbildung. Leipzig, 1912. — *Otto Wilkens*. Grundzüge der tekton Geologie, page 27 Iéna, 1912.

du système de coordonnées et $L_{\text{fixe}} = 13,3$ = la longueur du massif surélevé placé devant la lame plissée.

En plaçant, dans notre machine, la lame de plomb qui doit servir à l'expérience de plissement, nous tournons la manivelle jusqu'à ce que le repère marqué sur l'écrou se soit déplacé d'un centimètre sur l'échelle. C'est alors qu'a lieu la première lecture de la hauteur acquise par le pli. Dans la phase initiale du plissement, où l'augmentation de la hauteur est la plus forte, je produis un déplacement inférieur à 1 cm. ; alors les intervalles varient, suivant le besoin, entre 0,3 et 0,5 cm. Ce n'est qu'à partir du moment où le quotient $\frac{\Delta h}{\Delta z}$ va en diminuant que je produis un refoulement d'un centimètre. Prenons comme exemple, dans le schéma ci-joint, des couches disloquées par un plissement d'une largeur primitive L_0 et d'une largeur actuelle L_1 .



Suivant les valeurs différentes que nous donnerons à a et à c , nous obtiendrons des plis de nature différente et on comprend très bien que de Lapparent ¹ dise : « Comme d'ailleurs rien n'est plus variable que l'épaisseur des couches sédimentaires ou le poids qu'elles ont à supporter en chaque point, on conçoit sans peine qu'un même massif montagneux puisse offrir tous les modes de plissement imaginables. » Nous chargeons la couche à ses deux extrémités sur les longueurs a et c . Puis, nous tournons légèrement la manivelle jusqu'à ce que le repère de l'écrou se soit déplacé de 0,2 cm. Ce petit déplacement suffit déjà à la formation d'un pli de 3 $\frac{m}{m}$ de hauteur au point A. La ligne de faite est donc fixée. Nous enlevons maintenant le poids et laissons libre jeu à la marche du plissement. J'appelle l'ensemble du pli rudimentaire et des deux longueurs a et c le « déterminant » du plissement futur.

M. W. Paulcke ² part d'une idée semblable quand il dit : « Je

¹ De Lapparent. « Traité de Géologie », page 1941. Paris, 1906.

² Nos expériences étaient déjà terminées lorsque les travaux remarquables de M. W. Paulcke parvinrent à notre connaissance.

suis parvenu aussi à produire des plis et des chevauchements dans des régions déterminées par moi-même à l'avance de mon champ d'expérience. Pareillement, j'obtiens le « type tectonique » que je veux, en disposant mon expérience suivant des conditions analogues à celles qui me paraissent avoir déterminé le phénomène naturel correspondant¹. Les résultats obtenus ne sont pas *le fait du hasard*, mais bien des conséquences *voulues* de certaines *dispositions* prises intentionnellement².

Première série d'expériences³. — (Table I.) Soit *a* et *c* égaux à zéro, c'est-à-dire que si, abstraction faite de la pression horizontale et du poids de la lame, aucune force extérieure ne pèse sur une couche flexible, cette couche, n'étant comprimée à ses extrémités par aucune autre assise et n'ayant aucun contact avec elle, se soulèvera régulièrement en progressant vers son milieu. Il en résultera un pli droit symétrique. Mais comme, dans la nature, celui-ci ne se rencontre guère dans ces conditions, il ne nous intéresse pas ici. Par contre, il peut nous servir comme terme de comparaison avec la courbe 2. Cette comparaison nous fait découvrir immédiatement le rapport de la largeur primitive à la hauteur totale du pli :

*Ce rapport consiste en ce que l'extension horizontale allant en augmentant et l'intensité de plissement restant constante, la hauteur du pli augmente*⁴.

Application géologique. — C'est un fait universellement reconnu

¹ W. Paulcke. « Kurze Mitteilungen », page 65, Sonderabdruck.

² Les « formes concomittantes » de MM. R. de Girard et Vogt sont précisément le contraire « des résultats » de M. Paulcke : Elles naissent sans qu'on les ait cherchées et, puisque l'examen ultérieur de la carte montre qu'elles existent aussi dans la nature, elles prouvent que, involontairement, on avait réalisé dans l'expérience les dispositions de la nature.

³ Parmi toutes les expériences faites dans les I^{re} et IV^{me} séries, nous ne choisissons, pour les analyser, que celles qui ont donné le meilleur résultat, les nombreuses autres expériences faites par nous ne fournissent que des différences accidentelles et individuelles.

⁴ La définition de ce rapport fera l'objet d'une étude spéciale. Nous y emploierons, outre les lames de plomb, des lames de matière différente, dans l'espoir de découvrir ainsi un rapport entre les constantes physiques de ces diverses matières.

sur lequel *James Hall*¹, *J. Dana*² et *Ed. Suess*³ ont principalement attiré l'attention, que les plis de l'écorce terrestre dont le groupement a donné naissance aux chaînes de montagnes, sont formés de sédiments à facies pélagique. Sur la formation des Alpes, *M. Alb. Heim*⁴ dit :

« Nombreuses sont les assises sédimentaires où l'observation révèle un caractère de plus en plus pélagique quand on les suit du Nord vers l'intérieur des Alpes. »

Mais ces facies pélagiques ne se trouvent que dans les sédiments qui se sont formés dans de vastes océans et qui, par ce fait, ont pris en même temps une grande extension horizontale.

Herschel et *Dana* expliquent la formation des grands plis, dans les conditions indiquées, par le fait que le fond de la mer se ramollit et se prête ainsi au plissement. Or, les expériences de notre première série démontrent, de leur côté, que la formation des plis élevés exige un second facteur, c'est l'extension *horizontale primitive* des couches, supposée *implicitement* par ces géologues.

Seconde série. — Ici la prédisposition originelle (déterminant) du plissement est différente.

Je prends par exemple :

Dans la table II.

Pour la lame 3 $a = 20$ cm., $c = 1$ cm. ; L_0

Pour la lame 4 $a = 13$ cm., $c = 1$ cm. ; L_0

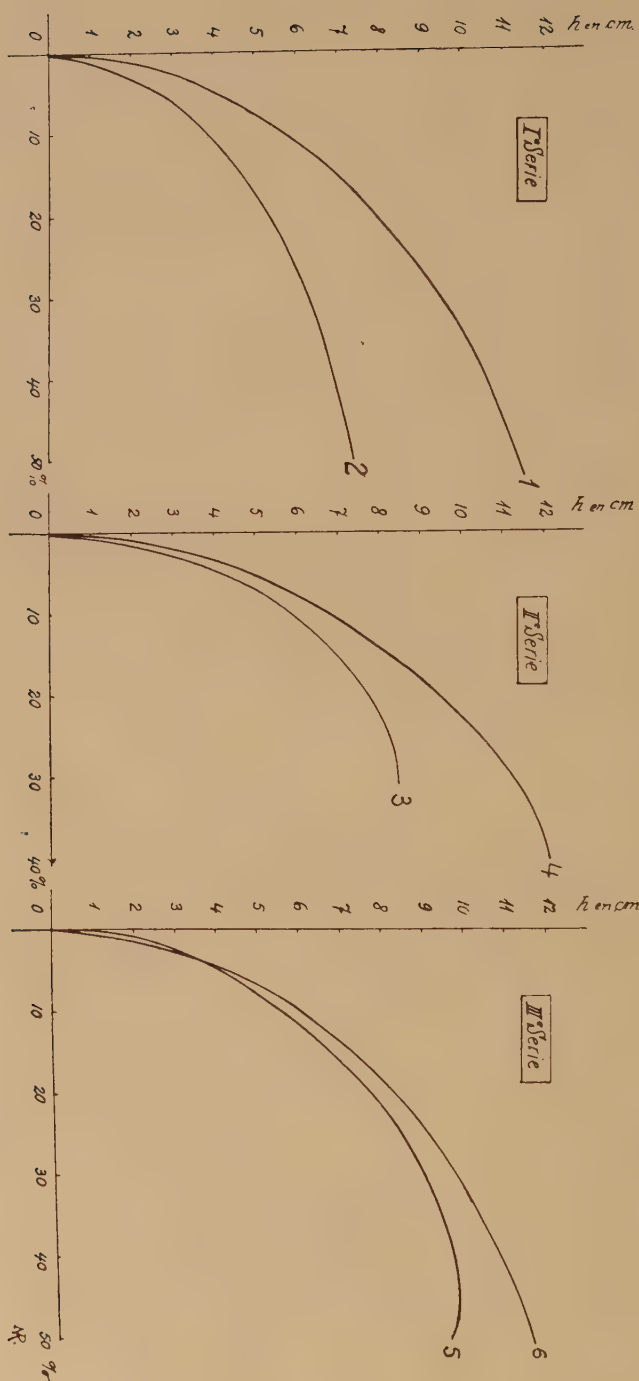
L'influence de la disposition primaire sur le développement de la hauteur est évidente, et cependant la courbe 4, quoique la largeur primitive ($L_0 = 38$ cm.) soit inférieure à celle de la courbe 3 ($L_0 = 40$ cm.), indique une augmentation beaucoup plus forte de la hauteur. Nous pouvons donc dire que ce que nous avons appelé le « déterminant » du plissement est, pour le développement de la hauteur, un facteur au moins aussi important que la longueur primitive de la couche. Ce facteur est si important qu'il peut rendre illusoire l'influence de la longueur primitive. C'est ce que nous démontrent les courbes 3 et 4.

¹ *James Hall*. Nat. History of New-York. Paleontology, 1857.

² *J. Dana*. 1875, page 748.

³ *E. Suess*. « Entstehung der Alpen ». — *De Lapparent*. Traité de géologie, page 1930. Paris, 1906.

⁴ *Alb. Heim*. « Mechanismus », I., page 166.



Troisième série. — Les déterminants *a*, *b* et *c* sont les mêmes pour chacune des courbes de cette série et les longueurs primitives sont égales. Seule, l'épaisseur de la courbe varie ; dans la lame 6 elle est 3 ½ fois plus forte que dans la lame 5. Les courbes établies d'après mes tables donnent d'une manière évidente le résultat suivant :

Plus la couche est épaisse, plus sera forte l'augmentation de hauteur et plus grande aussi la hauteur absolue du pli.

Le résultat que j'ai obtenu avec mes feuilles de plomb, *M. Rimbach*, plus tard, l'a obtenu aussi avec des couches de sable qu'il appliquait à un ballon de caoutchouc.

Il est intéressant de constater la concordance de mes expériences avec ses résultats. Dans sa 4^{me} expérience ¹, il dit du résultat : « Il se forme, à différents endroits de la bande, des contournements transversaux dont un certain nombre se transforment en failles inverses. Généralement ils apparaissent à des distances d'autant plus grandes et forment des chevauchements d'une ampleur d'autant plus longue *que la bande ou la partie correspondante de la bande est plus épaisse.* »

Application géologique. — Pour expliquer la formation de plis élevés, les mêmes géologues invoquent non seulement le facies pélagique et par suite la grande étendue des sédiments, mais encore l'épaisseur des couches qui prennent part au plissement. Seulement les auteurs lui assignent un rôle thermique consistant à réchauffer le fond du géosynclinal, tandis que mes expériences de la 3^{me} série prouvent que, indépendamment de toute action thermique, l'épaisseur des couches influe pour une raison purement mécanique sur la hauteur que les plis peuvent atteindre.

Quatrième série. — Les expériences de cette série ne s'étendent pas seulement aux relations entre le refoulement et la hauteur du pli ; nous y introduisons un élément nouveau qui n'est autre que le *déplacement de la ligne de faite* (axe du pli) le long de la surface de la couche ². D'où il résulte que, dans la seconde partie de cette série, nous sommes obligés de traiter des fractures. Nous observons en effet

¹ *C. Rimbach*. Loc. cit., page 693. 4^{me} expérience : « Refoulement de longues bandes de sable d'égale largeur mais dont l'épaisseur est différente. »

² Günther, *Geophysik*, p. 704. II. 1899.

que le déplacement de la ligne de faite dans une matière appropriée provoque toujours des phénomènes de fracturation. Nous étudierons le déplacement de la zone crevassée.

1. *Expériences sur des plissements sans fracture.* — Les lames de plomb, destinées à être plissées, ont été pourvues d'une division centésimale dans le sens opposé à la pression tangentielle et cela pour le motif que les barres de notre machine sont graduées à partir du buttoir.



Pendant le plissement on peut distinguer clairement deux phases :

La première embrasse le processus à partir de son origine jusqu'à la formation du pli droit ¹ et même jusqu'à ce que, le pli

¹ O. Wilkens, op. cit., page 10.

s'étant couché, sa charnière anticlinale vienne reposer sur son flanc inférieur.

La seconde comprend la progression dans le *processus* du plissement une fois que le pli s'est couché.

Ces deux phases, ainsi qu'il ressort clairement des courbes dans le tableau graphique (modèles X et XI), sont nettement distinctes l'une de l'autre.

D'après les éléments indiqués plus haut, nous distinguons trois espèces de courbes ¹ :

a) La courbe $F(z, h)$ dont la phase initiale nous est déjà connue par les expériences précédentes.

b) La courbe $F(z, x)$ nous renseigne sur les positions successives que prend le point médian de la charnière par rapport à un plan perpendiculaire à la direction de pression. Ce plan passait par la ligne de contact entre le flanc inférieur du pli couché et la face du « Horst » situé en avant de ce pli.

c) La courbe $F(z, k)$ indique la marche du point médian de la charnière sur la division centésimale de la couche.

Pour comparer ces différentes courbes entre elles, nous étudierons un des tableaux graphiques, par exemple celui qui correspond au modèle (10). La courbe « a » nous indique deux maxima et un minimum sur le côté supérieur au-dessous de l'axe des X, contrairement à la courbe simplifiée ², qui ne donne qu'un maximum. Pour cette

¹ Dans ces expériences, les feuilles de plomb ont toutes les mêmes dimensions : 30/30 cm. ; il est donc inutile d'exprimer le refoulement en pour cent.

a) Pour la courbe $F(z, h)$:

z mesure en *cm.* sur l'axe des x la valeur du refoulement absolu.

h mesure en *cm.* l'ordonnée du milieu de la ligne de faite.

b) Pour la courbe $F(z, x_r)$:

z a la même signification,

x_r mesure en *cm.* l'abscisse du milieu de la ligne de faite. (Dans les tableaux graphiques x_r est réduite à sa portion comprise entre le milieu de la ligne de faite et le plan vertical dont la trace horizontale représente la limite entre le champ de dislocation et le Horst adjacent.)

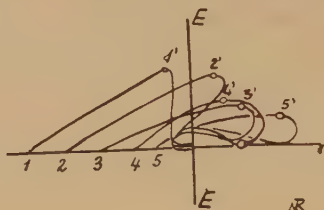
c) Pour la courbe $F(z, k)$:

z a la même signification.

k est l'index de l'ordonnée h . Il correspond à la division centésimale dans la couche.

² On trouvera la définition de ce terme plus tard : « Consid. théoriques ».

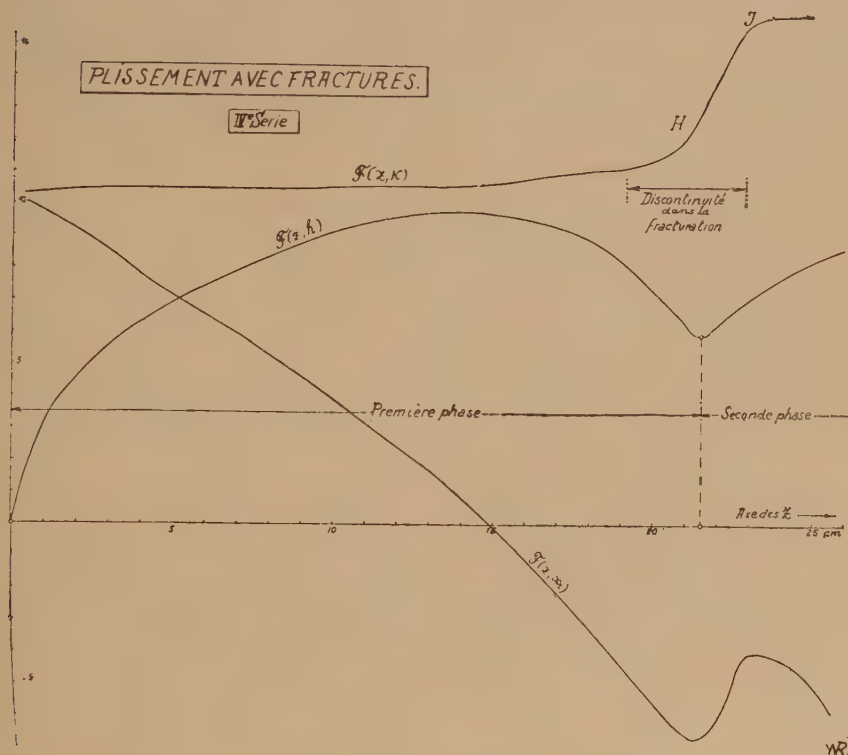
raison, le minimum qui apparaît est très caractéristique. L'abaissement de ce point se trouve avoir la même valeur que le refoulement, au moment où le pli s'étant couché sur ce point, sa charnière vient reposer sur son flanc inférieur. Le fait que nous nous trouvons en présence d'un minimum s'explique par l'oscillation de la ligne de faite $F(z, k)$. Tant que cette oscillation reste faible, notre couche nous fournit une figure semblable à celle de la courbe simplifiée théorique. Si notre ligne de faite n'oscillait pas, nous n'obtiendrions ni minimum ni second maximum. Une certaine concordance se manifeste aussi entre ces données et la courbe $F(z, x)$. Tant que la ligne de faite n'oscillait pas, cette courbe n'était que faiblement inclinée et pouvait à la rigueur être souvent remplacée par une droite. Ce n'est qu'au moment où cette oscillation¹ commence par un mouvement brusque ; que la ligne de faite rebondit vers le plan pour reprendre ensuite, avec le refoulement ultérieur, une marche uniforme. C'est ce que montre clairement l'esquisse schématique ci-jointe. Elle représente une section transversale d'un pli dans les différentes étapes de son refoulement.



2. *Expériences sur des plissements avec fractures.* — Ainsi que je l'ai indiqué plus haut, j'emploie pour ces expériences des lames de plomb recouvertes d'une couche d'argile. Le *processus* du phénomène est le même que dans les expériences antérieures. Ces expériences comprennent différents modèles (et tableaux) 9, 11, 12, 13, mais les tableaux qui se rapportent aux deux derniers modèles ont été éliminés pour le motif qu'ils ne fournissent aucune donnée nouvelle. Quant aux trois courbes précédentes, elles n'indiquent aucune différence essentielle, mais seulement quelques différences individuelles ; par conséquent nous constatons qu'il y a concordance entre les maxima et les minima.

¹ Voir les tableaux graphiques, partie H J.

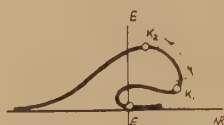
Modèle II. Au moindre plissement se manifestent, une à une, des fractures qui forment bientôt un faisceau continu. Celles-ci se dessinent à peu près perpendiculairement à la direction de la pression et par conséquent parallèlement au glissement de la courbe (1^{er} stade).



Avec l'intensité du refoulement, les fissures s'ouvrent progressivement (2^{me} stade) jusqu'au moment où le pli devient un pli en genou¹, dans lequel le rayon de courbure de la voûte tend vers son minimum. A ce minimum correspond un maximum de fracturation. Lorsque le refoulement a encore gagné en intensité et que le pli en genou s'est changé en un pli couché, la ligne de faite rebondit tout d'un coup de la position k_1 dans la position k_2 , ainsi que cela

¹ Nous entendons par pli en genou celui dont le flanc médian est vertical. La « Kniefalte » a été définie déjà par Kayser (Geologie).

ressort clairement du tableau graphique (partie HJ). Il s'ensuit que, entre k_1 et k_2 , la courbure n'est que très faible, tandis qu'en k_2 s'est formé un nouveau minimum du rayon de courbure, c'est-à-dire une nouvelle cause de fracturation. Par conséquent, à un mouvement brusque de la ligne de faite correspond une discontinuité dans la formation des fractures. Cette formation de fractures commence dès la fin de la première phase, c'est-à-dire dès que le pli droit s'est changé en un pli en genou.

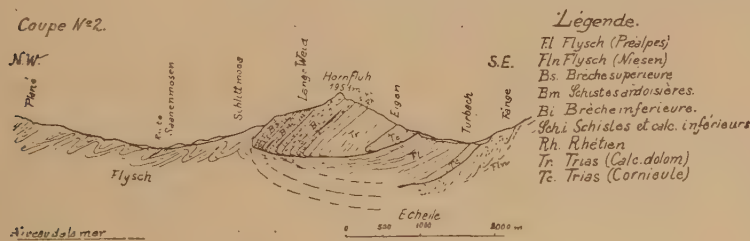


Les reproductions du modèle 11 3^{me} stade, et du modèle 12 3^{me} stade, nous montrent l'apparition de cette nouvelle zone des fractures en k_2 , tandis que les fractures en k_1 commencent à passer dans le flanc médian où elles vont se refermer progressivement. Les reproductions du modèle 13 nous permettent de nous faire une idée très exacte des différentes phases de ce *processus*.

Un léger refoulement initial provoque, déjà dans la première étape, la formation de ruptures très prononcées. Avec le progrès du plissement dans la 2^{me} étape, les fractures bâillent de plus en plus jusqu'à la formation du pli en genou dans la 3^{me} étape. La zone de fracture a atteint son maximum de dislocation. Le *processus* du plissement continue et, avant que le pli ne se couche, son flanc supérieur se courbe et prépare, dans sa 4^{me} étape, une nouvelle zone de fractures, tandis que les premières (comprises dans la 1^{re} zone) se trouvent dans le flanc médian. La photographie du stade 4 nous montre le pli en genou vu d'en haut. Dans le 5^{me} stade les fractures de cette zone nouvellement formée sont devenues béantes. La figure montre le flanc médian vu par dessous, tel qu'il est au moment où le stade 6 est atteint. La comparaison avec l'étape 3 nous fait voir que les fractures précédemment béantes se sont déjà beaucoup rétrécies.

Applications géologiques. I. — Admettons qu'aux temps hercy-niens la région la plus élevée de la chaîne des Alpes aît formé dans son ensemble un pli droit, dont le sommet correspon-dait à la ligne de partage des eaux. Si nous admettons, avec

M. Schmidt¹, que cette ligne dans la position hercynienne constituait la limite entre le facies méditerranéen et celui de l'Europe centrale, nous devons trouver, sur le flanc méridional du pli, le facies méditerranéen et sur son flanc septentrional le facies européen. Si, par conséquent, le plissement alpin a changé ce pli droit en un pli couché vers le nord, des terrains qui se trouvaient aux temps hercyniens sur le flanc méridional du pli ont pu, ainsi que le démontrent nos expériences, passer insensiblement de ce flanc supérieur au flanc moyen où ils apparaîtront en couches renversées. Or, examinons par exemple la coupe géologique de la Hornfluh (Préalpes bernoises) de M. Jaccard². Il est facile d'y constater le recourbement des couches, c'est-à-dire le passage du facies méditerranéen dans le flanc médian, au point où la charnière anticlinale repose sur le flanc inférieur. Mais le flanc médian semble avoir disparu par laminage et la « klippe » n'est que le reste d'une nappe chevauchée dérivant d'un pli couché. Ma figure reproduit l'esquisse de Jaccard avec, en plus, des lignes pointillées que j'y ai ajoutées pour indiquer la position renversée des couches tant que le flanc médian n'est pas aboli.



2. — M. Alb. Heim³ écrit dans son « Mechanismus » : « Le réseau des cassures qui sillonnent une masse rocheuse est l'image de la dislocation progressive de cette masse : quand le déchirement commence, les premiers linéaments de ce réseau apparaissent ; quand l'effort augmente, les traits se multiplient et le réseau se complète. A chaque instant de ce processus, il y a des fentes qui ont rempli leur rôle en

¹ C. Schmidt. « Bild und Bau der Schweizeralpen », page 82. Bâle, 1907.

² F. Jaccard. « La région de la Brèche de la Hornfluh » : Bulletin des Laboratoires de G. G. Ph. M. et P. de l'Université de Lausanne. Bulletin 5. Lausanne, 1904.

³ Op. cit., page 22.

épuisant l'effort capable d'écarter les molécules : elles peuvent se remplir de concrétions, mais des tractions nouvelles se font sentir et, sous leur influence, des fentes nouvelles vont apparaître, qui auront le même sort. » L'expérience démontre que les fissures s'ouvrent toujours le long de la charnière et que la zone fissurée se déplace avec celle-ci. Mais ainsi qu'il ressort de nos expériences ce *processus* n'est pas continu. Voilà pourquoi nous pouvons distinguer dans le *pli couché* deux zones de fractures : la première dans le flanc supérieur avec des fractures béantes ; la seconde qui, pendant le plissement, a passé dans le flanc médian et montre des fractures partiellement refermées. Entre ces deux régions se trouve une zone sans fissures ¹.

3. — L'expérimentation montre que, pendant la formation d'un pli, sa région culminante s'élève par deux fois aux grandes altitudes. Or la fragmentation de cette zone par les agents atmosphériques croît en intensité avec l'altitude ; d'autre part, ainsi que le démontre de nouveau l'expérience, les maxima de hauteur correspondent à chacune des deux zones de fissuration orogénique. Cette circonstance permet aux agents atmosphériques de pénétrer plus avant dans les ocuches et leur travail de destruction sera plus intense qu'il ne serait en l'absence des deux zones de fissurations. Les eaux courantes ou les glaciers emmènent les produits de cette fragmentation. Or ils ont à parcourir un chemin d'autant plus long que le pli d'où ils descendent est plus élevé. Les matériaux charriés étant amoindris en raison du chemin qu'ils ont parcouru, nous arrivons à la conclusion suivante :

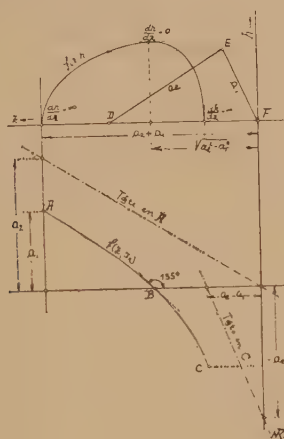
a) Le processus tectonique détermine à lui seul, en dernière instance, le *format* des sédiments déditriques.

b) L'altitude d'un pli en formation, passant comme nous l'avons montré par deux maxima successifs et chacun de ces maxima déterminant un minimum dans le format des sédiments, les dépôts constitués aux dépens d'un pli devront présenter dans leur succession deux niveaux à grains minimum.

Considérations théoriques. — Plissements. — Nous avons trouvé par voie expérimentale la loi qui régit l'accroissement en hauteur. Et cette loi s'est traduite pour nous en un graphique. Des difficultés

¹ Voir la figure 5.

d'ordre mathématique nous empêchent d'en donner la formule analytique. Cependant, en simplifiant le problème par des suppositions appropriées, nous pourrions en déduire l'équation d'une courbe simplifiée. La figure schématique ci-contre représente la section transversale d'un pli dont les flancs sont indiqués par les droites de longueurs constantes (a_2 et a_1) qui se coupent en E et dont les extrémités reposent sur l'axe des Z .



F étant le point fixe du massif surélevé, E se meut autour de F et chaque point de cette droite décrit un arc de cercle. Notre attention se portera principalement sur le mouvement du point E par rapport au système des axes $Z h$; nous en déduirons immédiatement l'équation de la courbe de ce point en mouvement :

$$a) f(z, h) = z - \sqrt{a_2^2 - h^2} + \sqrt{a_1^2 - h^2} = 0$$

et, en remplaçant h par $h = a_1^2 - x_r$:

$$b) f(z, x_r) = z - \sqrt{a_2^2 - a_1^2 + x_r^2} - x_r = 0.$$

De la constance des longueurs des droites a_1 et a_2 nous pouvons conclure qu'il ne saurait être question pour le point B de se déplacer à la surface de la couche plissée. Il y occupe dès l'abord une position fixe. Il faut donc renoncer ici à un élément essentiel qui aurait pu nous rendre de grands services pour l'intelligence des faits expéri-

mentaux, le déplacement de la ligne de faite dans la couche. Par conséquent, notre courbe simplifiée ne pourra jamais correspondre à la réalité.

$f(z, h)$ est l'équation d'une courbe fermée dont seule la partie située au-dessus de l'axe des Z nous intéresse. Elle présente une ressemblance frappante avec les courbes fournies par nos expériences sur la première phase du plissement. Pour des raisons déjà indiquées, je me suis dispensé d'analyser mathématiquement la deuxième phase du plissement. La courbe $f(z, x_r)$ ¹ de la première phase expérimentale concorde en tout point avec celle dont nous parlons maintenant.

Fractures. — Une fracture se forme au moment où, dans une section transversale quelconque d'un pli, la résistance de la roche est dépassée. La résistance à la traction des matériaux est indiquée généralement par une grandeur bien définie ² et dépendant directement de la cohésion de la matière.

D'après ce que M. Heim nous a appris relativement à la cohésion des masses rocheuses à l'intérieur de la lithosphère, nous savons que les fractures dans les couches plissées ne se rencontreront que rarement aux profondeurs moyennes et qu'elles ne se trouveront plus du tout aux grandes profondeurs.

Pour en revenir à nos expériences, nous constatons que, grâce au refoulement, notre lame limitée doit forcément se plisser en une forme cylindrique de telle manière que l'axe du cylindre se place horizontalement et perpendiculairement à la direction de la pression. Pendant le passage de la lame primitivement plane à sa forme cylindrique, le recourbement fait naître des tractions à la surface extérieure ³ (c'est-à-dire opposée au centre de courbure). Ces tensions sont tangentielles à la ligne de recourbement de cette surface et se trouvent dans des plans verticaux parallèles à la direction du plissement. Ainsi que nous l'avons vu, ces forces de traction, triomphant de la cohésion des matériaux, provoquent des fissures béantes s'ou-

¹ Voir page 37.

² E. Wiesmann. « Ueber Gebirgsdruck », page 89. — Revue polytechnique, tome 60. Zurich, 1912. « Ein Beitrag zur Frage der Gebirgs- und Gesteinsfestigkeit », loc. cit. tome 53, page 163.

³ C. Bach. « Elastizität und Festigkeit ». Berlin, 1905, page 489.

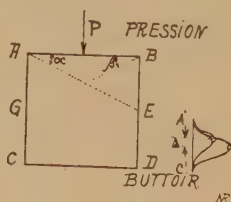
vrant de plus en plus à mesure que la traction augmente. Par le fait que les fissures s'ouvrent toujours perpendiculairement à la traction effective, leur trace horizontale sur le plan des couches se dessinera perpendiculairement à la pression horizontale, c'est-à-dire que dans notre cas les fractures devront se placer parallèlement à la direction de la couche.

Expériences diverses

Les résultats obtenus par les expériences précédentes, tout modestes qu'ils soient, ne sauraient cependant manquer d'intérêt.

A part ces expériences, j'en ai entrepris une série d'autres que des circonstances fortuites ne m'ont pas permis de terminer. Cependant je voudrais indiquer ici dans ses grandes lignes le plan général que j'ai suivi dans ces recherches.

Expériences sur l'influence du temps¹. — En taillant une lame rectangulaire de façon que l'un de ses côtés forme avec le refouloir un certain angle α et comprenne avec la direction de la pression un angle $\alpha + 90^\circ$, c'est-à-dire que la lame prenne la forme A C D E, nous verrons qu'à la naissance du plissement c'est d'abord le point A puis, après un certain laps de temps seulement, le point B qui sera atteint par la dislocation. En projetant ensuite les sections transversales AC et ED sur un plan perpendiculaire à la table d'opération et dont la trace court dans la direction de la pression, nous obtiendrons deux courbes superposées dont les elongations maximales² ne se superposeront qu'après un refoulement total et complet. D'où il ressort que la ligne de faite est toujours oblique par rapport à nos coordonnées dans l'espace et que sa projection horizontale, toujours dirigée vers B, forme avec la pression horizontale un angle $90^\circ - \beta$. La différence entre les grandeurs β et α n'est guère sensible.



Par là nous pouvons donc constater l'influence du temps.

t^0 pendant le plissement *initial*, où AC se plisse tandis que EB ne se plisse pas encore ;

¹ C. Bach. « Elastizität und Festigkeit », page 88.

² F et G sont des points de la ligne de faite.

2^o pendant le plissement *progressif*, où la ligne de faite a la tendance à se placer toujours davantage perpendiculairement à la direction de la pression ($\Delta = 0$). Ce que nous venons de dire ne s'applique qu'aux valeurs très petites de l'angle α . Il serait surtout intéressant d'étudier les différents plis en formation, en augmentant la valeur de l'angle α . Si l'on prend les valeurs de α un peu grandes, le point *E* se détache du substratum à cause de la trop grande rigidité de la lame ($\frac{1}{2}$ $\frac{m}{m}$ d'épaisseur sur 40-40 cm. de grandeur). Cet inconvénient pourrait être écarté en employant des lames de moindre épaisseur ou de plus grandes dimensions. Mais comme il est impossible de se procurer du plomb laminé d'épaisseur moindre que $\frac{1}{2}$ $\frac{m}{m}$ et que nous ne pouvions songer à construire pour le moment une machine plus grande, j'ai dû remettre à plus tard la suite de ces expériences. C'est pour ces mêmes raisons que les expériences qui vont suivre sont restées dans leur état naissant.

Les abscisses des courbes obtenues dans la figure précédente sont directement proportionnelles au temps, par le fait que la vitesse de dislocation a été maintenue constante. Par contre, tout autres seront les résultats si la vitesse de refoulement est accélérée de telle manière que la pression statique se change en une pression dynamique, c'est-à-dire en un choc.

Plaçons une lame de plomb ou une série de lames superposées dans notre appareil de telle manière qu'un de ses côtés soit appuyé solidement contre le refouloir tandis que le côté opposé sera séparé par un petit intervalle du buttoir *U* ou du massif surélevé. En tournant rapidement la manivelle nous arrivons à accélérer la vitesse des lames au point de provoquer un choc assez fort contre le massif surélevé.

Cette expérience imite, en quelque sorte, le déplacement d'une nappe. Or, en parlant de la nappe du Stockhorn-Chablais, M. Schardt ¹ écrit :

« Le mouvement de cette nappe de recouvrement doit être considéré comme un véritable glissement. La cause du mouvement doit être cherchée dans le fait que les plis s'accumulant dans la région interne de la chaîne il en résulta une surélévation de cette région centrale. Comprimée au flanc de ces plis et glissant sur la pente

¹ H. Schardt. « Die exot. Gebiete der Nordalpen » *Eclogae*, vol. V, N^o 4. 1898.

générale du pays soulevé, une bande sédimentaire de 300 km. de longueur s'est lentement *mise en route* vers la plaine. »

Ces nappes en mouvement sont arrêtées, d'après M. Lugeon¹ de deux manières. Il distingue la nappe à arrêt libre et la nappe à arrêt forcé. C'est cette dernière qui nous intéresse particulièrement. Remettons notre série de lames en mouvement. A un moment donné, celle-ci heurtera sur son chemin un obstacle (massif, Horst) et recevra de ce fait un choc en retour sur sa partie frontale. *L'expérience nous démontre qu'à cet endroit heurté les couches se plissent et que les plis passent par-dessus l'obstacle.* Cette expérience ne fait donc que corroborer l'explication fournie par M. Lugeon : « Le front de la nappe cherche à surmonter l'obstacle tout comme une vague de la mer cherche à couvrir l'écueil qu'elle rencontre. Ainsi dans sa partie frontale la nappe à arrêt forcé doit subir un mouvement ascensionnel. » La loi physique qui préside à ces phénomènes est facile à établir. Puis M. Lugeon continue : « L'arrêt du mouvement se propagera petit à petit du front vers la racine. Les masses antérieures seront déjà arrêtées que les masses en arrière seront encore en mouvement. » Pour des expériences analogues, les excellents travaux de MM. Schardt, Termier et Lugeon nous fournissent une ample matière de comparaison et révèlent des idées très variées.

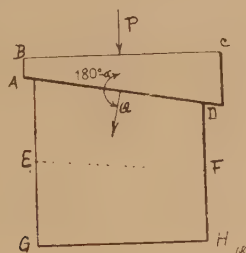


Par les expériences de la 1^{re} série, nous avons vu que, dans une lame soumise aux procédés expérimentaux de plissement déjà indiqués et déchargée de tout poids supplémentaire, le pli naissant se forme au milieu. Si nous accélérons la vitesse de manière à provoquer non plus une simple pression, mais un choc, la couche se plissera de nouveau à l'endroit heurté. Ce phénomène présente une analogie

¹ M. Lugeon. « Les nappes de recouvrement de la Tatra et l'origine des Klippes des Carpathes ». Bulletin de la Soc. vaudoise des sc. nat. 4^{me} S. Vol. XXX, N^o 146. Lausanne, 1903.

complète avec celui de la figure 2, avec la seule différence que la partie heurtée se trouve du côté opposé de la lame appuyée contre le massif surélevé.

Expériences sur l'influence de la direction de la pression. — Dans son « Mechanismus der Gebirgsbildung », M. A. Heim dit sur la formation des chaînes de montagnes que « les plis se forment à peu près perpendiculairement à la pression horizontale. » Or nous allons expérimenter, en donnant au refoulement des directions diverses. Nous avons recours à un procédé fort simple qui consiste à interposer entre le refouloir et la lame taillée *ad hoc* des pièces de bois triangulaires dans lesquelles l'angle α a des valeurs différentes. Cette disposition nous permet de décomposer la pression initiale P en deux composantes, dont l'une Q a la direction $180^\circ - \alpha$. Si nous partageons les droites AG et DH en parties égales et relions entre eux les points E et F ainsi obtenus, l'expérimentation nous montre que la *projection horizontale de l'axe du pli qui se formera sera toujours parallèle à la ligne EF* . En réalité, l'axe se trouve au-dessus du plancher de la machine et est incliné vers F . Ce que nous venons de dire ne vaut que pour de petites valeurs de l' α .



Expérience sur l'influence de la répartition des tensions ¹. — Dans les expériences précédentes, la tension était répartie également et uniformément le long des côtés des lames. Ces expériences peuvent être répétées avec une répartition discontinue de la tension. Nous

¹ G. Kirsch. « Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre ». Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, 1898, page 98.

A. Léon. « Ueber die Spannungsverteilung in der Umgebung einer halbkreisförmigen Kerbe ». Mitteilungen aus dem mech. techn. Laboratorium der k. k. tech. Hochschule, Wien, 1908.

l'obtenons de la manière suivante : Au lieu de faire agir la pression uniformément le long d'un côté de la lame, nous ne la ferons agir que sur certains points déterminés, grâce à l'intercalation de pièces de bois taillées *ad hoc* de nouveau. Les effets exercés par un massif à contour anguleux sur les lignes directrices d'un plissement voisin se rattachent à cette catégorie d'expériences.

Remarque finale

La géologie expérimentale est une science relativement jeune, qui attend encore son achèvement systématique. Il est vrai que ces dernières années ont marqué pour elle un progrès sensible, grâce à des découvertes importantes. Cependant elle n'est pas encore sortie de la phase des recherches incertaines et des tâtonnements ; rien d'étonnant donc de voir les savants observer une certaine réserve à l'égard de cette nouvelle branche de la science. Mais des noms connus comme ceux de MM. les prof. *R. de Girard*, *Königsberger* et *W. Paulcke* nous garantissent une floraison qui ne saurait tarder à se produire.



TABLES NUMÉRIQUES

PREMIÈRE SÉRIE

Courbe 1.

Feuille de plomb 27.9×27.9 cm. $e = \frac{1}{2}$ m/m (épaisseur)								
Lo	Lx	Lfix	$L_1 =$ $L_x - L_{fix}$	$L_2 - L_1$ $= Z\alpha$	$\frac{L_1}{L_0} = Zr$	$\frac{L_2 - L_1}{L_0}$ 100 %	hm.	$\frac{\Delta h}{\Delta Z\alpha}$
27.9	41.2	13.3	27.9	0	1.0	0	0	3.2
	41.0		27.7	0.2	0.993	0.717	14	1.4
	40.5		27.2	0.7	0.974	2.50	30	1.2
	40.3		27.0	0.9	0.968	3.23	34	0.9
	40.0		26.7	1.2	0.957	4.31	37	0.7
	39.3		26.0	1.9	0.931	6.82	47	1.2
	38.3		25.0	2.9	0.897	10.40	59	0.9
	37.3		24.0	3.9	0.850	13.90	68	0.7
	36.3		23.0	4.9	0.824	17.55	75	0.6
	35.3		22.0	5.9	0.790	21.25	81	0.6
	34.3		21.0	6.9	0.755	24.70	87	0.6
	33.3		20.0	7.9	0.692	28.30	93	0.5
	32.3		19.0	8.9	0.682	31.91	98	0.4
	31.3		18.0	9.9	0.647	35.50	102	0.3
	30.3		17.0	10.9	0.610	39.10	105	0.3
	29.3		16.0	11.9	0.573	42.70	108	0.3
	28.3		15.0	12.9	0.538	46.20	111	0.3
	27.3		14.0	13.9	0.510	49.90	114	0.3
	26.3		13.0	14.9	0.467	53.50	117	

Courbe 2.

Feuille de plomb 20.2×20.2 cm. $e = \frac{1}{2}$ m/m								
20.2	Lx	Lfix	$L_1 =$ $L_x - L_{fix}$	$L_2 - L_1$ $= Z\alpha$	$\frac{L_1}{L_0} = Zr$	$\frac{L_2 - L_1}{L_0}$ 100 %	hm.	$\frac{\Delta h}{\Delta Z\alpha}$
20.2	33.5	13.3	20.2	0	1.0	0	0	3.4
	33.0		19.7	0.5	0.975	2.4	17	2.0
	32.5		19.2	1.0	0.960	4.96	27	1.2
	32.0		18.7	1.5	0.927	7.43	33	1.0
	31.0		17.7	2.5	0.877	12.30	43	0.8
	30.0		16.7	3.5	0.827	17.30	51	0.4
	29.0		15.7	4.5	0.777	22.30	55	0.6
	28.0		14.7	5.5	0.728	27.30	61	0.4
	27.0		13.7	6.5	0.678	32.20	65	0.3
	26.0		12.7	7.5	0.629	37.10	68	0.4
	25.0		11.7	8.5	0.580	42.20	71	0.2
	24.0		10.7	9.5	0.530	47.00	73	0.1
	23.5		9.7	10.5	0.480	49.60	74	

SECONDE SÉRIE

Courbe 3.

Feuille de plomb 40.1 × 35.1 cm. $e = \frac{1}{2} \text{ m/m}$

Lo	Lx	Lfix	$L_1 =$ $Lx - Lf$	$L_0 - L_1$ $= Za$	$\frac{L_1}{L_0} = Zr$	$\frac{L_0 - L_1}{L_0} \text{ 100 } \%$	hm.	$\frac{\Delta h}{\Delta Za}$
40.1	66.1	26.0	40.1	0	1.0	0	0	3.0
	65.5		39.5	0.6	0.985	1.498	18	2.25
	65.1		39.1	1.0	0.976	2.50	27	1.50
	64.5		38.5	1.6	0.962	4.00	36	1.25
	64.1		38.1	2.0	0.952	5.00	41	1.67
	63.5		37.5	2.6	0.936	6.48	48	1.0
	63.1		37.1	3.0	0.927	7.49	52	0.4
	62.5		36.5	3.6	0.912	8.73	54	
	62.1		36.1	4.0	0.901	9.98	—	
	61.10		35.1	5.0	0.876	12.47	63	0.5
	60.10		34.1	6.0	0.852	14.97	68	0.5
	59.1		33.1	7.0	0.827	17.46	73	0.4
	58.10		32.1	8.0	0.802	19.95	77	0.3
	57.10		31.1	9.0	0.777	22.45	80	0.2
	56.10		30.1	10.0	0.752	24.95	82	0.2
	55.10		29.1	11.0	0.727	27.50	84	0.0
	54.10		28.1	12.0	0.702	29.50	84	

Courbe 4.

Feuille de plomb 38 × 38 cm. $e = \frac{1}{3} \text{ m/m}$

38.0	51.3	13.3	38.0	0	1.0	0	0	5.9
	51.0		37.7	0.3	0.992	0.79	17	3.3
	50.7		37.4	0.6	0.985	1.58	27	2.0
	50.3		37.0	1.0	0.974	2.63	35	2.0
	50.0		36.7	1.3	0.967	3.43	41	1.2
	49.5		36.2	1.8	0.953	4.73	47	1.2
	49.0		35.7	2.3	0.940	6.06	53	1.2
	48.5		35.2	2.8	0.927	7.37	59	1.0
	48.0		34.7	3.3	0.914	8.87	64	0.7
	47.0		33.7	4.3	0.887	11.32	71	0.8
	46.0		32.7	5.3	0.861	13.95	79	0.7
	45.0		31.7	6.3	0.834	16.60	86	0.6
	44.0		30.7	7.3	0.808	19.22	92	0.6
	43.0		29.7	8.3	0.782	21.85	98	0.5
	42.0		28.7	9.3	0.756	24.50	103	0.4
	41.0		27.7	10.3	0.729	27.10	107	0.5
	40.0		26.7	11.3	0.702	29.85	112	0.3
	39.0		25.7	12.3	0.677	32.40	115	0.3
	38.0		24.7	13.3	0.650	35.00	118	0.1
	37.0		23.7	14.3	0.624	37.70	119	0.2
	36.0		22.7	15.3	0.597	40.30	121	0.1
	35.0		21.7	16.3	0.572	42.90	122	0.1

TROISIÈME SÉRIE

Courbe 5.

Feuille de plomb 30 × 30 e = $\frac{1}{2}$ m/m

L ₀	L _x	L _{fix}	$\frac{L_1}{L_x - L_f}$	$\frac{L_0 - L_1}{Za}$	$\frac{L_1}{L_0} = Zr$	$\frac{L_0 - L_1}{L_0}$ 100 %	hm.	$\frac{\Delta h}{\Delta Za}$
30.0	43.3	13.3	30.0	0	1.0	0	0	5.67
	43.0		29.7	0.3	0.990	0.1	17	2.0
	42.5		29.2	0.8	0.973	2.67	27	1.8
	42.0		28.7	1.3	0.956	4.33	36	1.4
	41.5		28.2	1.8	0.940	6.00	43	1.0
	41.0		27.7	2.3	0.923	7.68	48	1.0
	40.5		27.2	2.8	0.917	9.38	53	1.0
	40.0		26.7	3.3	0.890	11.00	58	0.8
	39.5		26.2	3.8	0.873	12.68	62	0.8
	39.0		25.7	4.3	0.857	14.30	66	0.7
	38.0		24.7	5.3	0.823	17.70	73	0.7
	37.0		23.7	6.3	0.790	21.00	80	0.4
	36.0		22.7	7.3	0.757	24.30	84	0.4
	35.0		21.7	8.3	0.724	27.70	88	0.3
	34.0		20.7	9.3	0.691	31.00	91	0.3
	33.0		19.7	10.3	0.657	34.30	94	0.2
	32.0		18.7	11.3	0.623	37.70	96	0.2
	31.0		17.7	12.3	0.590	41.00	98	0.2
	30.0		16.7	13.3	0.557	44.30	99	0.1
	29.0		15.7	14.3	0.523	47.70	98	0.1
	28.0		14.7	15.3	0.490	51.20	96	0.2

Courbe 6.

Feuille de plomb 30 × 30 cm. e = 1.75 m/m

30.0	43.3	13.3	30.0	0	1.0	0	0	4.33
	43.0		29.7	0.3	0.990	0.1	13	3.20
	42.5		29.2	0.8	0.973	2.67	29	2.0
	42.0		28.7	1.3	0.956	4.33	39	1.0
	41.5		28.2	1.8	0.940	6.00	47	1.2
	41.0		27.7	2.3	0.923	7.68	53	1.0
	40.5		27.2	2.8	0.917	9.33	58	1.0
	40.0		26.7	3.3	0.890	11.00	63	0.8
	39.5		26.2	3.8	0.873	12.66	67	0.8
	39.0		25.7	4.3	0.857	14.32	71	0.7
	38.0		24.7	5.3	0.823	17.66	78	0.7
	37.0		23.7	6.3	0.790	21.00	85	0.6
	36.0		22.7	7.3	0.757	24.30	91	0.4
	35.0		21.7	8.3	0.724	27.70	95	0.4
	34.0		20.7	9.3	0.691	31.00	99	0.4
	33.0		19.7	10.3	0.657	34.40	103	0.4
	32.0		18.7	11.3	0.623	37.70	107	0.3
	31.0		17.7	12.3	0.590	41.00	110	0.2
	30.0		16.7	13.3	0.557	44.30	112	0.3
	29.0		15.7	14.3	0.523	47.70	115	0.2
	28.0		14.7	15.3	0.490	51.0	117	0.2

QUATRIÈME SÉRIE

Plissement sans fractures.

Feuille de plomb (30 × 30) cm²; e = 1/2 mm.

Lx	Lf	$Lx - Lf$ = L ₁	$L_0 - L_1$ = Za	$\frac{L_1}{L_0} = Zr$	x ₁₀	h ₁₀	x _r	r = k	h _k	x _s	h _s	
43.3	13.3	30.0	0	1.0								↑
43.0		29.7	0.3	0.99	23.5	0.8	21.6	7.0	1.0	17.7	0.3	↑
42.0		28.7	1.3	0.957	22.6	1.3	20.1	7.2	2.6	17.3	1.1	↑
41.0		27.7	2.3	0.92	21.9	2.3	19.5	7.4	3.8	17.0	1.7	↑
40.0		26.7	3.3	0.89	21.1	3.2	18.9	7.5	4.7	16.7	2.7	
39.0		25.7	4.3	0.86	20.2	3.9	18.2	7.5	5.3	16.5	2.5	
38.0		24.7	5.3	0.82	19.5	4.4	17.5	7.5	5.9	16.1	2.9	
37.0		23.7	6.3	0.79	18.7	4.8	16.8	7.6	6.3	16.9	3.2	
36.0		22.7	7.3	0.76	17.8	5.1	16.3	7.7	6.6	...	...	↓
35.0		21.7	8.3	0.72	17.0	5.4	15.3	7.8	6.9			
34.0		20.7	9.3	0.69	16.0	5.6	14.6	7.9	7.0			
33.0		19.7	10.3	0.66	15.1	5.7	13.5	8.0	7.0			
32.0		18.7	11.3	0.62	13.9	5.7	12.5	8.0	6.9			
31.0		17.7	12.3	0.59	12.8	5.5	11.5	8.1	6.6			
30.0		16.7	13.3	0.55	11.5	5.0	10.4	8.2	6.0			
29.0		15.7	14.3	0.52	10.3	4.1	9.1	8.5	4.9			
28.0		14.7	15.3	0.49	8.9	2.9	7.8	8.9	3.2			
27.0		13.7	16.3	0.45	7.9	2.8	7.8	10.2	2.7			
26.0		12.7	17.3	0.42	7.1	2.2	8.1	11.8	2.8			
25.0		11.7	18.3	0.39	6.8	2.0	8.2	12.0	3.0			
24.0		10.7	19.3	0.36	6.4	1.7	8.0	13.2	3.4			
23.0		9.7	20.3	0.32			7.9	13.7	3.7			
22.0		8.7	21.3	0.29			7.1	14.0	4.0			
21.0		7.7	22.3	0.26			6.5	14.2	4.2			
20.0		6.7	23.3	0.22			5.6	14.4	4.3			
19.0		5.7	24.3	0.19			5.0	14.8	4.3			
18.0		4.7	25.3	0.16			4.7	15.6	4.2	...	...	↓
17.0		3.7	26.3	0.12			4.0	16.0	4.1	...	...	↓

↑ Refoulement relatif du Jura
 ↑
 ↑
 ↓ Refoulement relatif des Alpes glaronaises
 —
 Refoulement relatif du Simplon
 (D'après C. Schmidt « Bild und Bau der Schweizer Alpen »).

N.-B. — Dans le tableau graphique tous les x sont diminués de L_f + 0.5 cm.
 = (13.3 + 0.5 cm).

QUATRIÈME SÉRIE

Plissement avec fractures.

Feuilles de plomb (30×30) cm²; $e = \frac{1}{3}$ mm. Couche d'argile de 2 mm.

Lo	Lx	Lf	$Lx - Lf$ $= L_1$	$L_0 - L_1$ $= Z_a$	$\frac{L_1}{L_0} = Zr$	x_s	h_s	x_r	$r = k$	h_k	x_{14}
30	56.0	26.0	30.0	0	1.0	30.5					
	55.5		29.5	0.5	0.98	30.4	0.8	36.6	10.3	2.0	40.2
	55.0		29.0	1.0	0.97	30.3	1.2	36.2	10.4	3.2	39.8
	54.0		28.0	2.0	0.93	30.2	1.7	35.8	10.4	4.6	39.2
	53.0		27.0	3.0	0.90	29.7	2.0	35.1	10.4	5.6	38.3
	52.0		26.0	4.0	0.87	29.7	2.4	34.3	10.5	6.3	37.5
	51.0		25.0	5.0	0.83	29.4	2.6	33.7	10.5	7.1	36.8
	50.0		24.0	6.0	0.80	29.2	2.8	33.0	10.5	7.5	36.0
	49.0		23.0	7.0	0.77	29.0	2.9	32.5	10.5	8.0	35.3
	48.0		22.0	8.0	0.74			31.7	10.5	8.5	34.5
	47.0		21.0	9.0	0.70			31.2	10.5	8.8	33.7
	46.0		20.0	10.0	0.67			30.4	10.6	9.1	32.9
	45.0		19.0	11.0	0.64			29.7	10.6	9.4	32.2
	43.0		17.0	13.0	0.57			28.2	10.6	9.7	30.5
	41.0		15.0	15.0	0.50			26.4	10.7	9.7	28.6
	39.0		13.0	17.0	0.43			24.4	11.0	9.4	26.6
	37.0		11.0	19.0	0.37			22.0	11.2	8.3	24.0
	35.0		9.0	21.0	0.30			19.7	12.1	6.3	21.6
	33.0		7.0	23.0	0.23			22.2	15.7	7.1	
	31.0		5.0	25.0	0.17			21.0	17.0	8.3	

TABLE DES MATIÈRES

I

Historique.

	Pages
<i>Généralités</i>	9
<i>Les expériences anciennes</i>	10
<i>Les expériences nouvelles</i>	11
Expériences du prof. de Girard et de A. Vogt	11
Expériences du prof. W. Paulcke	12
Expériences de M. C. Rimbach	13
Expériences du prof. Königsberger et de M. Morath	15

II

Les expériences de l'auteur.

<i>La méthode et l'appareil</i>	21
Description de la machine à plisser	21
La méthode.	24
La matière employée et ses dimensions	26
Le temps	27
<i>Expériences sur le rapport entre la valeur du refoulement et la hauteur d'un pli simple</i>	29
Généralités	29
Première série d'expériences.	23

	Pages
Application géologique	32
Seconde série d'expériences	33
Troisième série d'expériences	35
Application géologique	35
Quatrième série d'expériences	35
Expériences sur des plissements sans fractures	36
Expériences sur des plissements avec fractures	39
Application géologique	40
Considérations théoriques	42
Plissements	42
Fractures	44
<i>Expériences diverses</i>	<i>46</i>
Expériences sur l'influence du temps	46
Expériences sur l'influence de la direction de la pression	49
Expérience sur l'influence de la répartition des tensions	49
<i>Remarque finale</i>	<i>51</i>
Tables numériques	52
Table des Matières	59



CURRICULUM VITAE

Né le 11 avril 1885, à Schwyz, j'y fréquentai l'école primaire et le gymnase industriel. En 1904, je passai mon examen de maturité. Je fus alors immatriculé à l'Ecole polytechnique de Zurich (section du génie civil) que je quittai, en 1909. Je passai deux ans dans la pratique et, en 1911, fus immatriculé à l'Université de Fribourg (Faculté des sciences) où je passai, le 24 novembre 1913, mon examen de doctorat.

A Fribourg, je suivis les cours de MM. les professeurs Daniëls, de Girard, Girardin et de Kowalski. A tous mes maîtres, je présente ici l'hommage de ma vive reconnaissance.



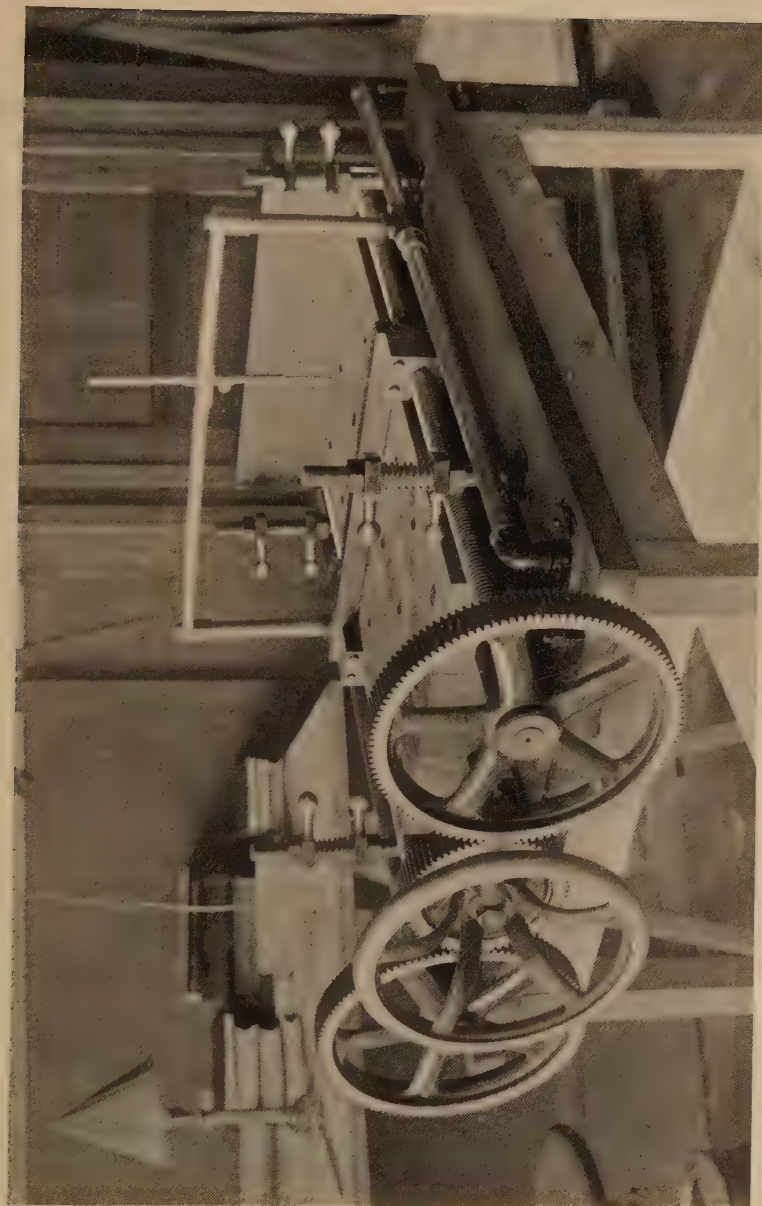


FIG. 1. — Vue perspective de l'appareil entier.



Fig. 2. — Vue perspective du plancher mosaïque.

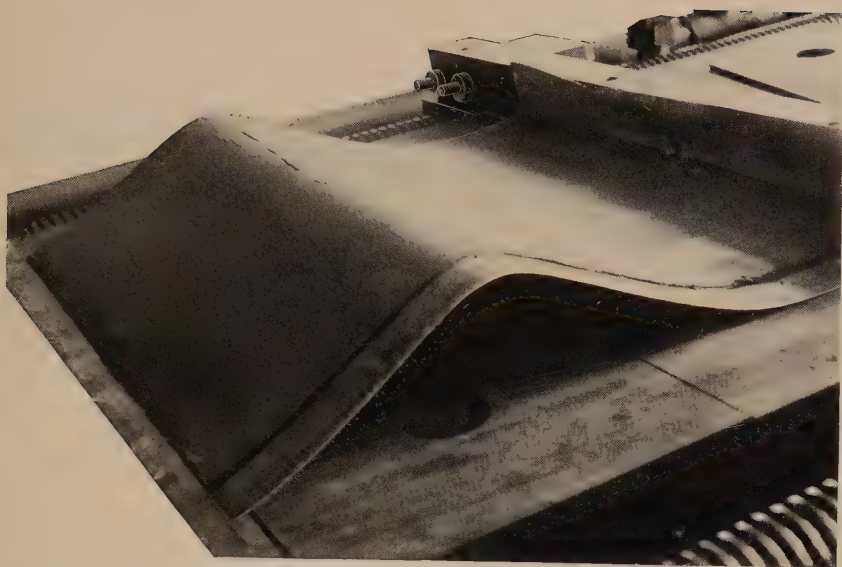


FIG. 3. — Modèle 11 ; Premier stade.



FIG. 4. — Modèle 11 ; Deuxième stade.

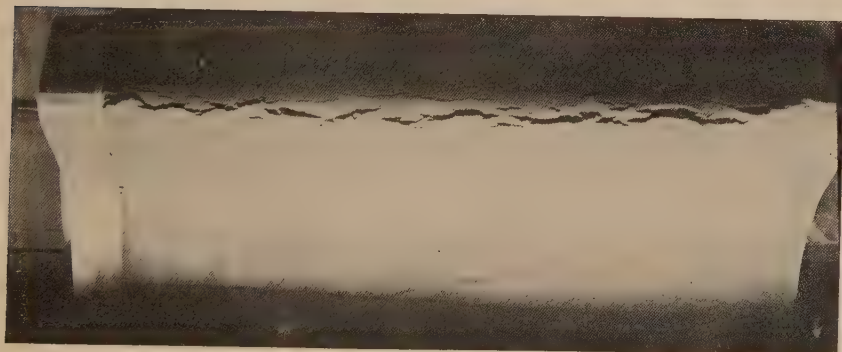


FIG. 5. — Modèle 11 ; Troisième stade.



FIG. 6. — Modèle 13; Premier stade.

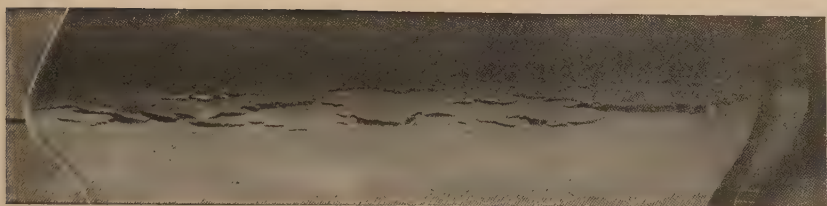


FIG. 7. — Modèle 13; Deuxième stade.

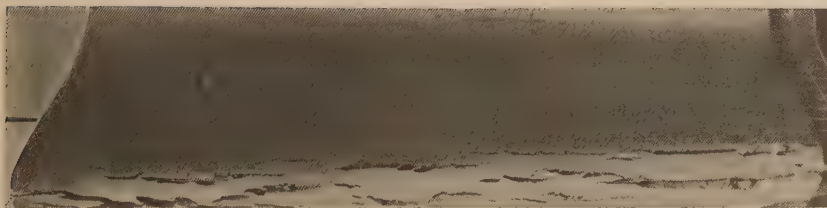


FIG. 8. — Modèle 13; Troisième stade.

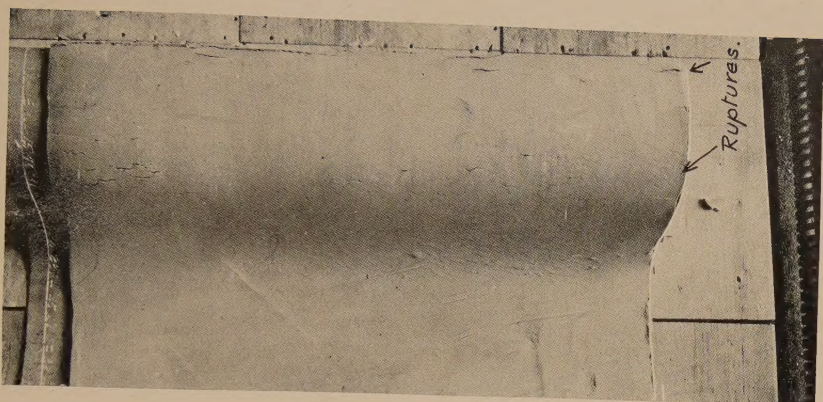


FIG. 9. — Modèle 13; Quatrième stade.



FIG. 10. — Modèle 13; Cinquième stade.

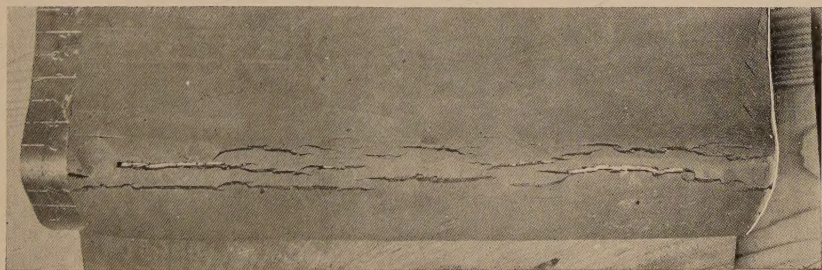


FIG. 11. — Modèle 13; Sixième stade.

